
hidrográfico
marinha · portugal
ACTAS
4as
JORNADAS
DE ENGENHARIA
HIDROGRÁFICA
21, 22 E 23 DE JUNHO DE 2016


ACTAS
4as
JORNADAS
DE ENGENHARIA
HIDROGRÁFICA
21, 22 E 23 DE JUNHO DE 2016

Lisboa

Título - Actas das 4.as Jornadas de Engenharia Hidrográfica
Autor - Instituto Hidrográfico
Tiragem - 230 exemplares
Edição e paginação - Instituto Hidrográfico, 2016
Impressão e acabamento - Grafilinha - Trab. Gráficos e Publicitários, Lda.
ISBN - 978-989-705-097-8
Depósito Legal n.º 410025/16

Indice

I. Comissões 9
Honra, Científica e Organizadora

II. Patrocinadores e Apoios 11

III. Nota Introdutória 15

IV. Resumos Alargados 17

HIDROGRAFIA 19

Integração do LiDAR Terrestre em Hidrografia 21
J. Cruz, L. Santos, J. Vicente e T. Dias

A Cartografia Hidrográfica da Via Navegável do Douro 25
J. Vicente, J. Coutinho e P. Costa

Apoio à decisão para a ativação da Equipa Hidrográfica de Intervenção Rápida na busca de objectos 29
M. Miranda, J. Vicente e F. Ferreira

A retroreflexão acústica na coluna de água como apoio ao controlo de qualidade da informação batimétrica 33
P. Carvalho, T. Dias, C. Marques e J. Vicente

Incerteza de um levantamento hidrográfico: adequabilidade da utilização de fiadas de verificação para inferência estatística em áreas de declive acentuado 37
T. Dias, C. Monteiro e J. Vicente

A utilização de imagens de satélite multiespectrais de elevada resolução espacial para a derivação de batimetria 41
R. Guerreiro e A. Moura

Utilização de técnicas de deteção remota na definição de áreas de navegação segura: caso da Ria Formosa 45
C. Sousa e A. Almeida

Produtos especiais de apoio às operações navais – AML 49
I. Fortes, A. José, H. Julião, R. Almeida e L. Manteigas

As potencialidades da derivação de batimetria a partir de imagens de satélite multiespetrais na produção de cartografia náutica 52
A. Moura, R. Guerreiro e C. Monteiro

Utilização de modelos de ondulação de geoide em levantamentos hidrográficos em Cabo Verde 56
J. Gaspar, J. Vicente e M. Arenga

NAVEGAÇÃO 61

Provas de Governo e Manobra 63
J. Luís

Projecto AMOS - serviço de previsão para suporte à navegação e atividade portuária 67
A. Silva, J. C. Leitão, P. Galvão, P. C. Leitão, M. S. Malhadas, H. Santos, J. Ribeiro, E. Aires, S. Bartolomeu e J. Rodrigues

Assinalamento marítimo – Análise de risco da via navegável 71
J. E. Santos Teles

Utilização do Simulador de Navegação no desenvolvimento de competências não técnicas para os Oficiais de Quarto à Ponte 75
J. Basso e V. Conceição

Análise da manobra de recolha de homem ao mar com Functional Resonance Analysis Method 79
H. Bravo e V. Conceição

O Farol como Centro de Serviços Marítimos 83
C. Ventura Soares

87 Índice do Estado do Mar nas aproximações aos portos
M. Alves, J. P. Pinto, S. Almeida, P. Mota, A. Jorge da Silva, L. Lamas, R. Deus e N. Almeida

91 Sistema de Alerta para a Navegação em Portos
L. Pinheiro, P. Lopes, C.J.E.M. Fortes, J. Santos, P. Poseiro e T. Reis

95 OCEANOGRAFIA OPERACIONAL

97 Análise de dados de agitação num ponto da costa portuguesa. Implicações para o dimensionamento de quebra-mares verticais
R. Ferreira, M. G. Neves, T. Oliveira e R. Esteves

101 Metodologia de análise e correção de medições de componentes de velocidade por ADV para propagação de ondas
J. M. P. Conde, C. F. Neves e C. J. E. M. Fortes

105 Marine Renewable Energy Resources Atlas for Western Iberia
F. J. Campuzano, M. Juliano, R. Fernandes and R. Neves

109 An integrated framework for implementing operational coastal models
D. Brito, R. Fernandes, F. Braunschweig, S. Braunschweig, F. Campuzano and A.R. Trancoso

113 Forecasting wave propagation in littoral areas using SMARTWAVE
J.P. Pinto and D. Mendes

117 Assessing the impact of meteorological models in coastal and estuarine surface drift forecasting systems
R. Fernandes, D. Brito, F. Braunschweig, A.R. Trancoso and F. Campuzano

121 Plataforma integrada WebSIG para apoio à gestão da emergência em eventos de inundação em estuários
A. Oliveira, J. Rogeiro, J.L. Gomes, P. Pinto, A. B. Fortunato, P. Freire, R. T. Costa, L. Sá, R. Pablo e A. Mendes

125 Evaluation of Remote Sensing Altimeter and ASAR Wave Data in the Eastern Nortern Atlantic
I. Bué, Á. Semedo, J. Catalão and L. Aouf

129 Uso do modelo HYCOM no planeamento de um voo não tripulado de observação do oceano
M. Guerreiro, A. Jorge da Silva, I. Golde e L. Quaresma

131 OCEANOGRAFIA FÍSICA

133 Mecanismo da pluma β e sua aplicação ao sistema da Corrente e Contracorrente dos Açores
C. Lopes da Costa

137 Comparação de dados entre a boia ondógrafo de Leixões e outros registos/modelações
T. Abreu, P. Baptista, A. Bouzas, P.A. Silva, C. Ferreira e C. Bernardes

141 Detecting the surface signature of eastern Atlantic low-level coastal jets with ASCAT
I. T. Monteiro, J. Stander A. Lourenço, C. Barroso and N. Moreira

143 Inundação das margens do estuário do Tejo: o caso da tempestade de fevereiro de 1941
A.B. Fortunato, P. Freire, X. Bertin , M. Rodrigues, M.L.R. Liberato e J. Ferreira

147 Modelling tsunamis with a non-hydrostatic version of the MOHID model
J. C. Silva, A. A. Pires Silva ,P. C. Leitão and A. J. Silva

151 Propagação de ondas em canal de largura variável – Modelação numérica
D. R. C. B. Neves, A. A. Pires Silva, C. J.E.M. Fortes e Jorge S. G. Matos

155 A Comparison with Reanalyses Data of Global Coastal Low-Level Wind Jets
D. C.A. Lima, P. M.M. Soares, A. Semedo, R. M. Cardoso

159 The Douro Estuary: Modelling comparison for floods prevention
I. Iglesias, S. Venâncio, R. Peixoto, J.L. Pinho, P. Avilez-Valente, J. Vieira

163 Subida do Nível Médio do Mar em Cascais, revisão da taxa actual
C. Antunes

Wave Climate Changes in the North Atlantic towards the end of the Twenty-first Century **167**
G. Lemos, A. Semedo, A. Behrens, M. Dobrynin, P. Miranda and J. Staneva

Climatology and structure of the summer winds off the Iberian west coast **171**
N. Rijo, A. Semedo, P. Miranda, D.C.A. Lima, P.M.A. Soares and R. M. Cardoso

Fishing areas characterization using satellite, numerical model and HF radar data **175**
L.Lamas, P.B. Oliveira, J.P. Pinto, S. Almeida, R. Deus, A. Jorge da Silva and N. Almeida

Salinity evolution in the Tagus estuary relative to climate change **179**
M. Rodrigues, A. B. Fortunato and P. Freire

Satellite-derived SST and in situ observations assessment off the Portuguese marine waters **183**
R. Vicente, R. Esteves, L. Lamas, J. P. Pinto, S. Almeida, E. Azevedo, C. Correia and F. Reis

Non-linear infra-gravity and sea-swell wave-wave interactions at S. Jacinto beach **187**
D. Mendes, A.A. Pires-Silva, J.P. Pinto and A.B. Fortunato

Observations of infra-gravity waves at S. Jacinto beach **191**
D. Mendes, A.A. Pires-Silva, J.P. Pinto and A.B. Fortunato

A first glance at S. Mateus seamount (Azores Islands). The REP15 picture **195**
J. Vitorino, I. Martins and M. Marreiros

Circulação costeira no barlavento Algarvio no verão e outono de 2015 **199**
P.B. Oliveira, M. Santos, T.Moita and A. Amorim

Previsão do runup no sector poço da cruz – praia de Mira **203**
L. Tubarão, P.A. Silva, P.R. Baptista, T. Luna, A. Rocha, I.Giannoukakou-Leontsini

Evolution of the tidal prisms at the inlets of the western sector of Ria Formosa before the relocation of the Ancão inlet in November 2015 **207**
J. Jacob and A. Cravo

Estudo e Análise da Vulnerabilidade Costeira face a cenários de subida do nível médio do mar devido às alterações climáticas **211**
C. Rocha, C. Antunes e C. Catita

Intensidade energética sob temporais marítimos: casos de estudo de Espinho e do litoral da Ria Formosa **215**
F. Sancho, A.S. Beirão e M.G. Neves

Details of the Mediterranean Outflow Water propagation in the eastern Bartolomeu Dias Plateau (Gulf of Cadiz) **219**
A. Jorge da Silva

OCEANOGRAFIA GEOLÓGICA **223**

Estudo da dinâmica sedimentar no troço costeiro entre o Cabo Mondego e a praia da Leirosa **225**
C. Ferreira, P. Silva, C. Coelho P. Baptista e A. Bouzas

A first approach to numerical modelling of the Douro estuarine dynamics using Delft3D freeware modelling suite **229**
A.I. Santos, A. Oliveira, J. P. Pinto and M. C. Freitas

Cross-calibration of suspended sediment sensors and samples at a fixed station in the Tejo estuary (SEDEX 2015) **233**
A.I. Santos, A. Oliveira and S. Moreira

Tidal suspended sediment signature variation at a fixed station in the Tejo estuary (SEDEX 2015) **237**
A.I. Santos, A. Oliveira and S. Moreira

Agitação marítima e potencial de transporte sedimentar longitudinal a sul da embocadura do rio Mondego **241**
J. N. C. Oliveira, F. S. B. F. Oliveira e A. Teixeira

Evolução da linha de costa a sul da embocadura do rio Mondego: modelação do impacte do prolongamento do molhe norte **245**
J. N. C. Oliveira, F. S. B. F. Oliveira e A. Teixeira

249 Estudo da dinâmica sedimentar da plataforma continental do Algarve utilizando areias marcadas
I. Bosnic, J. Cascalho, R. Taborda, T. Drago, M. Rosa e J. Hermínio

253 Obras de contenção do enchimento artificial da Praia da Nicha, Luanda – Angola
M. Lemos, L. Veiga, B. Caldas e R. Bonanata

257 Modelling morphological evolution in the surrounding area of a groyne: preliminary results
F. S. B. F. Oliveira

261 The effect of storm events in the Tagus estuarine margins
P. Freire, A. B. Fortunato, M. Rodrigues, P. P. Santos, A. Rilo and A. O. Tavares

265 Shoreline evolution modelling on platform beaches
R. Taborda and M. Ribeiro

269 OCEANOGRAFIA QUÍMICA

271 Metais vestigiais (Cu, Zn e Pb) em sedimentos intermareais do estuário inferior do Sado – Estabelecimento de valores de fundo geoquímico e avaliação da ocorrência de contaminação
S. Moreira, M. C. Freitas e M. F. Araújo

275 Metodologias para a Identificação de Fontes de Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
A.C. Rocha, P. Santos e C. Palma

279 ValorSul - Monitorização Ambiental de Sedimentos (2004-2015)
M. Valença, A. Gama e C. Palma

283 Evolução temporal das propriedades físicas e químicas do baixo estuário do rio Arade, 2015-2016
C. Correia, A. Cravo e J. Jacob

287 Is there a seasonal fingerprint in the mass exchanges between the main inlet of Ria Formosa and the Atlantic ocean?
A. Rosa , A. Cravo e J. Jacob

291 Role of the Faro-Olhão inlet and adjacent channels on the mass exchanges with the coastal zone – ef-fect of the driving mechanisms in Autumn 2012
A. Cravo, A. Ovelheiro and J. Jacob

295 Aplicação de cartas de controlo na monitorização de resultados de ensaios de comparação interlaboratorial
D. Carinhas, C. Borges e P. Infante

299 Análise de metais em sedimentos – contribuição dos ensaios interlaboratoriais
A. Gama, T. Santos e C. Palma

303 Compostos orgânicos no sedimento superficial do rio Tejo: caso prático da Valorsul
P. Santos, A.C. Rocha e C. Palma

307 Análise de tendências no desenvolvimento fitoplantónico em zonas costeiras portuguesas recorrendo a dados de campo e de deteção remota: Estudo preliminar no Estuário do Tejo
A. Mendonça, C. Borges e C. Palma

311 GEOLOGIA MARINHA

313 Parâmetros geofísicos dos sedimentos superficiais da desembocadura do rio Tejo
A. Oliveira, S. Moreira, N. Lapa, A. I. Santos, R. Santos, J. Pombo e J. Duarte

317 Chemical composition of submarine degassing areas in São Miguel Island (Azores archipelago)
L. Moreno, F. Viveiros, R. Couto, C. Silva, P. Range, D. Geraldes and J. E. Pacheco

320 Volcanic gas emissions offshore of São Miguel and Faial islands (Azores archipelago)
F. Viveiros, L. Moreno, M. Carreiro-Silva, R. Couto, C. Silva, P. Range, D. Geraldes, H. Parra, T. Ferreira and J. Pacheco

324 Preparação de amostras em pó para análise quantitativa por DRX
A. Oliveira, M. Cabral, J. Duarte e J. Pombo

Erosional and sedimentary processes on the submarine flanks of Madeira archipelago: Preliminary results **327**
R. Quartau, R. Santos, A. Rodrigues and C. Monteiro

Estrutura sismo-estratigráfica da parte terminal do vale do Tejo **331**
A. Vinhas, A. Rodrigues e L. Reis

The heavy mineral sorting process: the example from Grande beach (Sintra, Portugal) **335**
J. Cascalho, M. Ribeiro, R. Taborda, A. Rodrigues, J. Reis, J. Duarte and A. Oliveira

Análise morfo-sedimentar da cabeceira do canhão de Aveiro **339**
N. Lapa, A. Rodrigues e F. Marques

Caraterização remota da cobertura sedimentar do fundo marinho do arquipélago da Madeira através de dados de retrodispersão acústica - Resultados preliminares do Programa SEDMAR **343**
R. Santos, A. Rodrigues, R. Quartau e C. Monteiro

Estimativa do tamanho médio das partículas sedimentares no canal de embocadura do rio Tejo através da técnica "Angular Range Analysis" **347**
R. Santos e A. Rodrigues

A estrutura e a evolução recente do Mar da Ericeira **351**
A. Rodrigues e F. Ferreira

Principais estruturas geológicas observadas na plataforma continental ao largo de Sesimbra **355**
A. Vinhas e A. Rodrigues

A importância dos modelos sedimentológicos nos projetos *offshore* de energias renováveis **359**
J. Pombo, A. Rodrigues e A. P. Silva

Evolução morfológica e sedimentar do porto de Portimão entre 2000 e 2015 **363**
L. I. Portela e F. Duarte

SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E GESTÃO DE DADOS DO AMBIENTE MARINHO **367**

Estado da Arte nas Base de Dados dos Dados Maregráficos e Cruzeiros Científicos **369**
A. Lopes, F. Gomes, B. Inácio, E. Magalhães, A. Branquinho e F. Vasquez

Assessing coastal erosion risk in a GIS environment **373**
A. Bio, J. A. Gonçalves, M. Arcos Santos, H. Granja, J. Pinho and L. Bastos

Using surfcams online streaming images for nearshore hydrodynamic characterization **377**
U. Andriolo, E. Sánchez-García and R. Taborda

SICA-SIGPAS **381**
A. Nobre

Recuperação dos registos de reflexão sísmica - modo analógico para o digital com a máquina fotográfica **385**
R. Melo, R. Santos e A. Rodrigues

SIMOcean: Maritime Open Data and Services Platform for Portuguese Institutions **389**
N. Almeida, N. Grosso, N. Catarino, R. Deus, L. Lamas, M. Alves, S. Almeida and P. Oliveira

Building an information system for managing quality multidisciplinary open access data on seamounts within Portuguese waters **393**
I. Farias, G. Camacho, A. Campos, G. David, M. T. Guerra, V. Henriques, A. Marraccini, A. Rocha and A.Santos

A produção de cartografia náutica a partir de um sistema de Bases de Dados **397**
I. Patriarca, P. Sanches, A. Moura, A. Manuel e J. Cardoso

Vulnerabilidade à inundação da zona ribeirinha de Lisboa devido à subida do nível do mar como consequência das alterações climáticas **401**
M. Sousa, C. Antunes e C. Catita

Data discovery mechanisms and metadata handling in RAIA Coastal Observatory **405**
A. Rocha, M. A. Oliveira, F. Freire, G. David, P. M. Vilar, B. V. Taboada, I. Iglesias, C. Lázaro, L. Bastos, I. van Golde and A. Jorge da Silva

409 A aplicação ANOSOM_SIG como ferramenta de gestão de risco em estruturas de proteção costeira e portuária
R. Lemos, J. Siva, C.J.E.M. Fortes, M.T. Reis e P. Lopes

413 TECNOLOGIAS DO MAR E ENGENHARIA OCEANOGRÁFICA

415 Deteção, localização e inspeção dos destroços do caça minas “Roberto Ivens”
F. Ferreira, P. Costa, M. Miranda e C. Fradique

419 Análise numérica do desempenho de dois dispositivos de aproveitamento de energia das ondas de tipo coluna de água oscilante
E. Didier , P.R.F. Teixeira e M.G. Neves

423 Sistema híbrido fotovoltaico/eólico/diesel aplicado a um navio – estudo energético, ambiental e económico
A. Nunes

427 Automatic SeaSonde HF Radar Antenna Pattern Generation Using AIS Data: Espichel Case Study
P. Agostinho, C. Whelan, C. Fernandes and A. Alonso-Martirena

431 Bares 2.0 wave buoy and sustainable buoy network
P. González, X. Fernández

435 Video imagery technique for wave celerity estimation: results on rocky-shore platform
U. Andriolo, A. Azevedo, A.M., Nobre Silva, R. Taborda and C. Lira

439 Economic decision factors in site selection for offshore renewable energy projects
M. Silva, J. Cândido e I. Machado

443 Património Cultural Subaquático: Abordagens e Tecnologias
A. Salgado, J. Freire T. Fraga e J. Russo

447 Posicionamento de amostras sedimentares através de sistema de posicionamento acústico USBL
S. Silva, N. Lapa, A. Vinhas, R. Santos, J. Duarte e F. Ferreira

451 Observações de processos litorais: casos de estudo de S. Jacinto e Gelfa
N. Moreira da Costa, D. Mendes, B. Boto das Neves e A. Jorge da Silva

455 Observation of the near-shore circulation with lagrangian drifters developed by the RAIA coastal observatory
A. Jorge da Silva, D. Mendes, J.P. Pinto, B. Loureiro, M. Oliveira and A. Rocha

459 Utilização da retrodispersão acústica normalizada na deteção de objectos
R. Santos, A. Rodrigues, F. Ferreira, C. Fradique, M. Miranda e C. Monteiro

463 Modelação física em canal da propagação de ondas na Praia da Galé, Algarve
A. Ramos, C.J.E.M.Fortes, J.M.P. Conde, S. Gabriel e R. Reis

467 MarinEye – A prototype for multitrophic oceanic monitoring
A. dos Santos, C. Magalhães, E. Silva, C. Bartilotti, C. Churro, S. Cotrim, R. Marques, A. Silva, S. M. Leandro and the MarinEye project team

470 A Navigation System for the LUSO ROV
P. Abreu, A. Calado, P. Madureira, A. Pascoal, J. Ribeiro, M. Ribeiro, L. Sebastião and H. Silva

474 Networked Marine Vehicles for Reflection Seismic Surveying: the EC WiMUST Project
P. Abreu, A. Pascoal, J. Ribeiro, M. Ribeiro, L. Sebastião e H. Silva

478 Investigating the use of a video technique for wave run-up measurements on a breakwater in a laboratory flume
U. Andriolo, P. Poseiro, M.T. Reis, A. P. Bastos, C.J.E.M. Fortes and T. Garcia

481 Travel distance of wave overtopping at a rubble mound breakwater with a recurved wall: comparison between physical modelling and empirical formulas
P. Poseiro, M.T. Reis, C.J.E.M. Fortes and T. Garcia

485 Índice de autores

I.

Comissões

COMISSÃO DE HONRA

Ministro da Defesa Nacional, *Prof. Doutor José Alberto Azeredo Lopes*
Ministro da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, *Prof. Doutor Manuel Heitor*
Ministro do Ambiente, *Eng.º João Pedro Matos Fernandes*
Ministra do Mar, *Eng.ª Ana Paula Vitorino*
Presidente da Câmara Municipal de Lisboa, *Dr. Fernando Medina*
Chefe do Estado-Maior da Armada, *Almirante Luís Macieira Fragoso*
Diretor-geral do IH, *Contra-almirante António Manuel de C. Coelho Cândido*
Bastonário da Ordem dos Engenheiros, *Eng.º Carlos Matias Ramos*
Reitor da Universidade de Lisboa, *Prof. Doutor António Cruz Serra*
Reitor da Universidade Nova de Lisboa, *Prof. Doutor António Bensabat Rendas*
Reitor da Universidade do Porto, *Prof. Doutor Sebastião Feyo de Azevedo*
Reitor da Universidade de Aveiro, *Prof. Doutor Manuel António Assunção*
Reitor da Universidade dos Açores, *Prof. Doutor João Luís Gaspar*
Reitor da Universidade do Algarve, *Prof. Doutor António Branco*
Presidente da Academia de Marinha, *Almirante Francisco Vidal Abreu*
Presidente do Comité Português para a Comissão Oceanográfica Intergovernamental da UNESCO, *Prof. Doutor Mário Ruivo*
Presidente da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, *Prof. Doutor Paulo Ferrão*
Presidente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, *Eng.º Carlos Pina*
Presidente do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, *Prof. Doutor Miguel Miranda*
Diretor da Comissão Cultural de Marinha, *Vice-almirante Augusto Mourão Ezequiel*
Comandante da Escola Naval, *Comodoro António Henriques Gomes*
Presidente da Fórum Oceano, *Prof. Doutor António Nogueira Leite*
Presidente da Organização Hidrográfica Internacional, *Captain Robert Ward*
Diretor da European Global Ocean Observing System, *Dr. Erik Buch*

COMISSÃO CIENTÍFICA

Doutora Anabela Campos Oliveira, Marinha, IH (presidente)
Engenheira Ana Leonor Veiga, Marinha, IH
Doutora Antonina dos Santos, IPMA
Prof. Doutor António Pascoal, IST
Prof. Doutor António Pires Silva, IST
Capitão-de-Fragata Engenheiro Hidrógrafo António Santos Martinho, Marinha, IH
Doutora Aurora Rodrigues Bizarro, Marinha, IH
Doutora Carla Maria Palma, Marinha, IH
Prof. Doutor Carlos Antunes, FCUL
Engenheiro Carlos Vale, CIIMAR
Capitão-de-mar-e-guerra Engenheiro Hidrógrafo Carlos Ventura Soares, AMN, DGAM
Capitão-de-mar-e-guerra Engenheiro Hidrógrafo Fernando Freitas Artilheiro, Marinha
Capitão- de-fragata Hidrógrafo João Delgado Vicente, Marinha, IH
Doutor João Cascalho, FCUL
Doutor José Paulo Pinto, Marinha, IH
Capitão-de-fragata Engenheiro Hidrógrafo Leonel Pereira Manteigas, Marinha, IH
Primeiro-tenente Oceanógrafo Quaresma dos Santos, Marinha, IH
Engenheiro Marcos Rita, PIANC
Capitão-de-fragata Nuno Sousa Rodrigues, Marinha, IH
Doutor Pedro Viterbo, IPMA
Doutor Rúben Miguel Santos, Marinha, IH
Capitão-Tenente Engenheiro Hidrógrafo Rui Pinto da Silva, Marinha, IH
Professor Doutor Rui Taborda, FCUL
Doutor Rui Quartau, Marinha, IH
Engenheira Teresa Sá Pereira, OE
Professor Doutor Virgílio Mendes, FCUL
Professor Doutor Victor Lobo, Marinha, CINAV
Capitão-de-fragata Victor Plácido da Conceição, Marinha, EN

COMISSÃO ORGANIZADORA

Capitão-de-fragata Engenheiro Hidrógrafo José Mesquita Onofre (presidente)
Doutora Aurora Rodrigues Bizarro
Capitão-tenente Química Isabel Cristina Cruz
Capitão-de-fragata Hidrógrafo Miguel dos Reis Arenga
Capitão-tenente Engenheiro Hidrógrafo Rui Pinto da Silva
Dra. Teresa Manuela Correia

II.

Patrocinadores e Apoios

KONGSBERG MARITIME

Fugro OCEANOR

CARIS

ESRI Portugal

MRA Instrumentação

Projeto Co-ReSyf

QUALITAS INSTRUMENTS

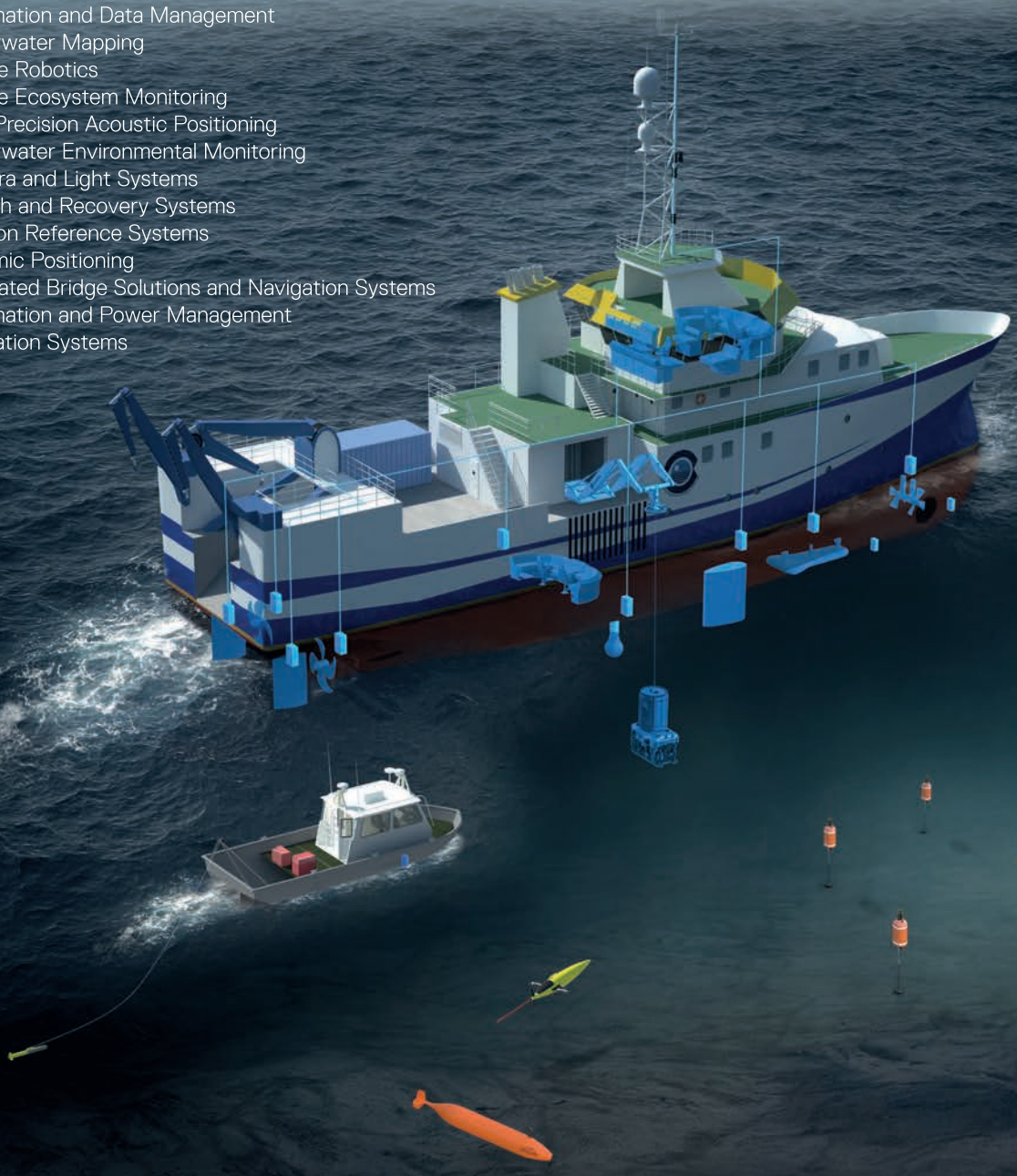
Com o apoio de:
Fundação Vodafone Portugal

KONGSBERG

THE FULL PICTURE
FOR OCEAN SCIENCE

FULLY INTEGRATED SOLUTIONS FROM KONGSBERG MARITIME

- Automation and Data Management
- Underwater Mapping
- Marine Robotics
- Marine Ecosystem Monitoring
- High Precision Acoustic Positioning
- Underwater Environmental Monitoring
- Camera and Light Systems
- Launch and Recovery Systems
- Position Reference Systems
- Dynamic Positioning
- Integrated Bridge Solutions and Navigation Systems
- Automation and Power Management
- Simulation Systems



km.kongsberg.com

III.

Nota introdutória

Os resumos alargados reunidos neste livro resultam dos trabalhos apresentados nas 4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, que decorreram em Lisboa, nas instalações do Instituto Hidrográfico, nos dias 21, 22 e 23 de junho de 2016.

O Instituto Hidrográfico, órgão da Marinha e Laboratório do Estado no âmbito das ciências e das técnicas do mar, organizou este quarto evento, na semana do Dia Mundial da Hidrografia, 21 de junho, este ano subordinado ao tema "*Hidrografia – a chave para a boa gestão das vias marítimas*", assumindo-se como um fórum nacional de natureza científica focado nas ciências do mar.

As cerca de cento e vinte comunicações apresentadas, orais e pósteres, foram divididas pelas sessões de hidrografia, navegação, geologia marinha, sistemas de informação geográfica, gestão de dados do ambiente, tecnologias do mar, engenharia oceanográfica e oceanografias operacional, física, geológica e química.

A quantidade e a diversidade de trabalhos recebidos atestam o interesse desta iniciativa, não só de jovens técnicos e investigadores, como também de autores nacionais de reconhecido mérito, assim como de participantes de Espanha, Brasil e Noruega. Foi, assim, possível reunir comunicações da academia, de instituições públicas, das quais diversos Laboratórios do Estado, de empresas e de representantes de projetos de I&D.

Em nome do Instituto Hidrográfico, agradeço a todos os envolvidos nestas Jornadas, esperando que a experiência e contactos proporcionados possam ter contribuído para o enriquecimento pessoal, profissional e científico. Sublinho, ainda, o empenho e o entusiasmo demonstrados pelo pessoal deste Instituto envolvido na preparação e execução do evento e em especial pela Comissão Organizadora e pela Comissão Científica. Relevo, também, o valioso préstimo das entidades, nacionais e estrangeiras, que se quiseram associar ao Instituto Hidrográfico na organização das Jornadas, pois foi crucial para levar este evento a bom porto.

Desejo finalmente que o conjunto dos trabalhos aqui publicados seja representativo daquilo que se faz com qualidade em Portugal e que este evento tenha contribuído para consolidar e divulgar o trabalho realizado, todos os dias, em prol das ciências do mar.

Bem hajam!

O DIRETOR-GERAL

António Manuel de C. Coelho Cândido
Contra-almirante

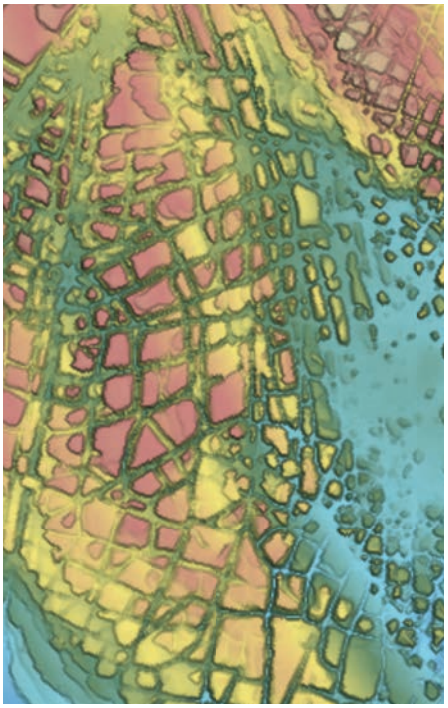
IV.

Resumos Alargados

HIDROGRAFIA

4as JORNADAS DE ENGENHARIA HIDROGRÁFICA

21, 22 E 23 DE JUNHO DE 2016



Integração do LiDAR Terrestre em Hidrografia

J. Cruz (1), L. Santos (2), J. Vicente (1) e T. Dias (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49 1249-093 Lisboa, ventura.cruz@hidrografico.pt.

(2) Leica Geosystems Portugal.

Resumo: O Instituto Hidrográfico tem como uma das principais atribuições a recolha de informação topo-hidrográfica com vista à produção de cartografia náutica atualizada.
No cumprimento desta missão são realizados levantamentos topo-hidrográficos sistemáticos no mar e ao longo da costa. Em determinados casos é requerida a realização de levantamentos topo-hidrográficos em águas muito pouco profundas, com busca total do fundo, ou em zonas com afloramentos rochosos ligeiramente submersos.
Com os sistemas sondadores atuais, cuja eficiência está diretamente relacionada com os valores de profundidade, a realização destes levantamentos apresenta uma rentabilidade muito baixa. Do mesmo modo, determinar a orografia de áreas com afloramentos rochosos é uma atividade com elevado risco para os meios e equipamentos utilizados.
O presente artigo pretende apresentar o trabalho desenvolvido em conjunto pelo Instituto Hidrográfico e pela *Leica Geosystems* Portugal na avaliação da aplicabilidade e integração do LiDAR terrestre com as metodologias utilizadas nos levantamentos topo-hidrográficos.

Palavras-chave: Levantamentos topo-hidrograficos, sistemas sondadores, laser scanning.

1. INTRODUÇÃO

Reconhecido como um Laboratório do Estado cuja competência está diretamente relacionada com as ciências e técnicas do mar, uma das principais atribuições do Instituto Hidrográfico (IH) diz respeito à recolha de informação topo-hidrográfica destinada à produção de cartografia náutica atualizada. Para garantir o cumprimento desta missão são realizados levantamentos topo-hidrográficos (LTH) sistemáticos no mar, ao longo da costa, incluindo infra-estruturas construídas em terra com interesse para a navegação marítima. Para além da recolha de dados de profundidade nas áreas de interesse, os LTH têm igualmente como objetivo a recolha de dados georreferenciados relativos à configuração da linha de costa, composição do fundo marinho, entre outros. Estas tarefas podem ter diversas aplicações, como por exemplo, a atualização cartográfica, a caracterização e monitorização ambiental, cálculo de volumes dragados, estabelecimento de canais de navegação ou definição da linha de costa. Quando é requerida uma busca total do fundo, a realização de levantamentos hidrográficos (LH) com recurso aos sistemas acústicos tradicionais pode ser uma tarefa muito pouco rentável, visto que a eficiência desses sistemas está diretamente relacionada com as profundidades disponíveis. Acresce ainda o facto de em alguns casos, a área de trabalho ser inacessível para as embarcações disponíveis, ou possuir vários perigos para os equipamentos e meios de sondagem, como, por exemplo, estruturas rochosas parcialmente submersas. Adicionalmente, para operar com os sistemas sondadores atuais, é requerido o emprego de diversos recursos humanos especializados (hidrógrafo, patrão da embarcação, etc.) e utilização de equipamentos dispendiosos associados aos sistemas sondadores.

A aquisição de dados altimétricos em praias ou zonas entre marés com equipamentos *Global Navigation Sattelite Systems* (GNSS), é uma tarefa igualmente morosa e com o risco associado ao tipo de terreno que tem de ser percorrido. Em áreas confinadas ou de pequena dimensão também não é economicamente rentável o recurso a sistemas fotogramétricos ou de varrimento por laser aéreo *Light Detection and Ranging* (LiDAR).

Com o objetivo de encontrar uma forma de otimizar estas tarefas, foi desenvolvido um trabalho conjunto entre o IH e a *Leica Geosystems* Portugal (LGPT), que consistiu na aquisição de dados hidrográficos numa zona entre marés com o *laser scanner* terrestre *Scanstation P40* da *Leica Geosystems* (Leica Geosystems, 2015). Para avaliar esta informação foram utilizados dados adquiridos num LH realizado com um sistema sondador multifeixe (SMF) *Kongsberg* EM 3002 (Kongsberg, 2005).

O presente artigo pretende apresentar os resultados obtidos neste trabalho e demonstrar que a integração de dados adquiridos por sistemas de LiDAR terrestre com os dados adquiridos por sistemas sondadores acústicos tradicionais é uma possibilidade válida em cenários muito específicos, e poderá ter aplicabilidade na realização de tarefas associadas à hidrografia e, consequentemente, nas atividades do IH.

2. METODOLOGIA

A *Scanstation P40* da *Leica Geosystems* é um *laser scanner* terrestre de elevada velocidade de varrimento, com capacidade para emitir até 1 milhão de impulsos por segundo com uma precisão de 3 mm a uma distância de 10 m. A sua principal aplicação consiste na representação tridimensional de objetos, infraestruturas ou cenários nos domínios da engenharia, arquitetura ou até no campo da ciência forense.

O sondador acústico utilizado para realizar a comparação com os dados adquiridos pelo *laser scanner*, o *Kongsberg* EM3002, é um sondador multifeixe de elevada resolução, próprio para realizar LH em águas pouco profundas. Trabalha na gama de frequências dos 300 kHz, com uma taxa máxima de transmissão de impulsos de 40 Hz e possui uma largura de feixe de 1,5° x 1,5°.

Para a aquisição de dados foi selecionada uma área junto ao terminal de barcos de passageiros do Barreiro, caracterizada por fundos lodosos e sedimentos de origem biológica, com muito pouca profundidade nos períodos da preia-mar e com algumas porções de área a descoberto nos períodos de baixa-mar.

Selecionada a área de trabalho, foram realizados dois levantamentos: um com a *Scanstation* P40 da *Leica* no período da baixa-mar (figura 1) e outro com o SMF na preia-mar.

Com o objetivo de garantir uma comparação o mais correta e exata possível, tanto a referência vertical e horizontal foram comuns aos dois levantamentos.



Fig. 1. Operação da ScanStation P40 da Leica Geosystems no local do trabalho.

Foi estabelecida uma rede local partilhada por ambos os sistemas, materializada pela utilização de pontos de apoio ao posicionamento cujas coordenadas foram previamente obtidas com observações GNSS. Recorreu-se assim aos pontos de apoio para orientar o *laser scanner* e para instalar a estação de referência para o posicionamento da embarcação de sondagem.

Posteriormente procedeu-se ao levantamento com o *laser scanner* no período da baixa-mar, cujo resultado, em forma de nuvem de pontos, é ilustrado na figura 2. Foram efetuados 4 varrimentos completos a partir de locais diferentes, onde foram adquiridas nuvens de pontos com uma resolução de 3 mm a 10 m de distância. Optou-se ainda pela utilização da câmara fotográfica digital interna do *laser scanner*, com o objetivo de avaliar a aplicabilidade da informação radiométrica neste tipo de locais. Cada leitura teve assim uma duração de 13 min: 3 min para varrimento laser e 10 min para a aquisição da radiometria (274 imagens com 5 MGpx de resolução cada).

Foi ainda possível aplicar metodologias topográficas para a orientação da *Scanstation P40* devido ao seu compensador biaxial.

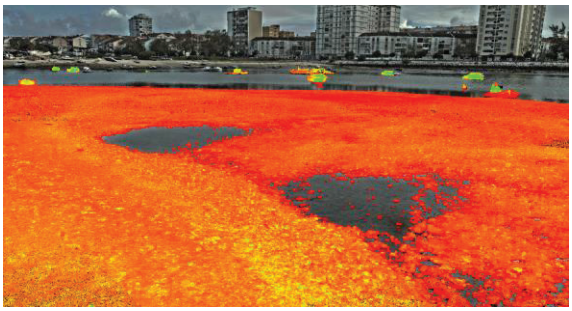


Fig. 2. Nuvem de pontos em tons de intensidade sobre a imagem planisférica obtida pela câmara interna da ScanStation P40.

O LH com o SMF EM3002 decorreu durante o período da preia-mar com profundidades que variaram entre 1 m e 5 m de profundidade (figura 3). Para a aquisição dos datagramas de posicionamento e atitude da embarcação, recorreu-se ao equipamento *Seapath 200 RTK* (Kongsberg, 2006). As correções ao posicionamento foram transmitidas em *Differential Global Navigation Satellite Systems* (DGNSS), no modo *Real Time Kinematic* (RTK). Importa ainda referir que os levantamentos foram efetuados com um intervalo de 43 dias.

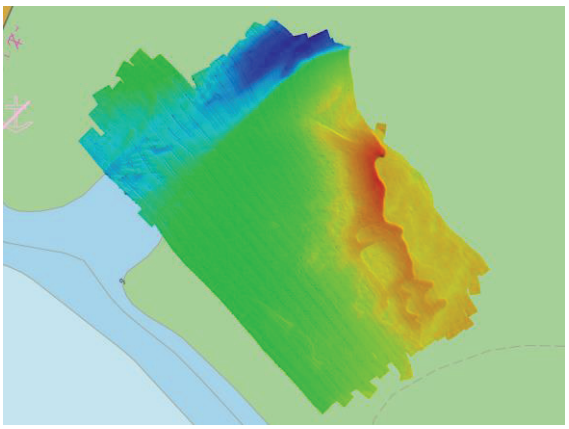


Fig. 3. Área sondada com o SMF EM3002.

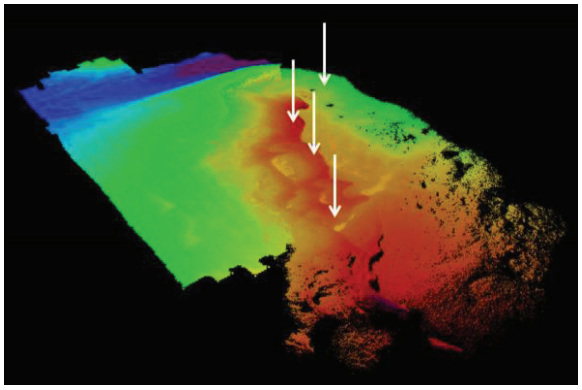
3. RESULTADOS

Os dados adquiridos com o SMF foram importados e processados pelo IH na aplicação *CARIS HIPS and SIPS* (HIPS) versão 9.1.1 (CARIS, 2016). A redução da sondagem da altura de maré foi efetuada com recurso à informação obtida pelo sistema de posicionamento DGNSS RTK. O produto final gerado a partir do processamento dos dados multifeixe foi uma superfície *Combined Uncertainty Bathymetry Estimator* (CUBE) (Calder e Wells, 2007; Vicente *et al.*, 2012) com 25 cm de resolução (figura 4), e um ficheiro de texto em formato ASCII com coordenadas retangulares e profundidades referidas ao Nível Médio Adotado (NMA).

Por outro lado, os dados adquiridos com a *Scanstation P40* foram importados e processados pela LGPT no *software Cyclone* versão 9.1.4 (Leica Geosystems, 2016). A partir do registo e limpeza da nuvem de pontos obtida, foi criada uma malha de pontos que originou a superfície final. Como produto final foi exportado igualmente um ficheiro de texto ASCII com as coordenadas retangulares e altitudes dos pontos observados referidas ao NMA.

Os ficheiros ASCII criados foram partilhados entre as duas instituições. Na LGPT foi igualmente criada uma malha com base no ficheiro ASCII resultante do levantamento hidrográfico com o sondador multifeixe e comparada com a malha construída a partir da nuvem de pontos da *ScanStation P40*.

Simultaneamente, na aplicação HIPS, tendo por base um algoritmo próprio de construção de modelos batimétricos com recurso aos valores de profundidades mínimas, o ficheiro ASCII proveniente do processamento da LGPT originou uma superfície *Shoalest Depth True Position* (SDTP) com resolução de 25 cm (figura 4). Essa superfície foi igualmente comparada com o modelo batimétrico resultante do levantamento hidrográfico com o sondador multifeixe (figura 5).



[2] A capacidade para aguentar a guinada é uma medida da reação do navio ao "contra-leme", ou seja à introdução de leme contrário ao já introduzido.

[3] A estabilidade dinâmica representa a capacidade do navio estabilizar rapidamente a uma nova proa, sem necessidade de qualquer ajuda por parte do leme, após uma pequena perturbação que o tenha desviado da proa original.

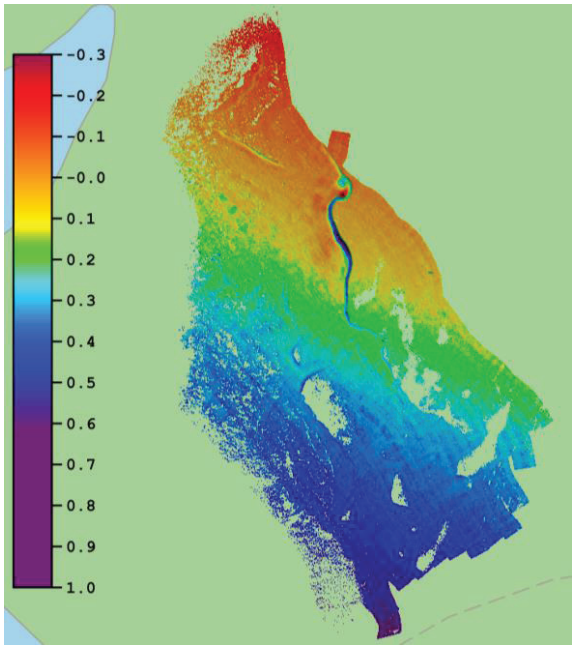


Fig. 5. Superfície das diferenças entre SMF e laser scanner (valores em metros).

Os indicadores estatísticos resultantes da comparação entre os levantamentos demonstraram uma média das diferenças de 0,23 m (SMF mais profundo) com um desvio padrão de 0,17 m.

Todavia, a análise à superfície das diferenças permite observar que as zonas onde os valores são mais acentuados correspondem a áreas onde o fundo é de natureza lodosa, e mais afastadas dos pontos de estacionamento do *laser scanner*. Nos locais onde o fundo é constituído essencialmente por sedimentos de origem biológica, de natureza mais dura e sujeitos a menor penetração dos feixes acústicos do SMF, as diferenças são inferiores a 0,10 m. A análise à superfície das diferenças permite ainda inferir que a orografia do fundo na área do trabalho sofreu modificações entre a realização de ambos os levantamentos, visto que estes foram realizados com um intervalo de 43 dias, sendo que em alguns desses dias se verificaram condições meteorológicas adversas, nomeadamente chuva intensa, que contribuem para a intensificação da dinâmica sedimentar da zona.

Assim, considerando os fatores que poderiam condicionar os resultados desta comparação de dados entre os dois sistemas, nomeadamente: distintos métodos de deteção do fundo; propagação do som na água *versus* emissões eletromagnéticas; diferentes especificações técnicas dos sistemas; métodos de posicionamento e de processamento de dados distintos; natureza do fundo inadequado para deteção *laser* devido à sua natureza lodosa e de cor escura, e a diferença temporal na realização dos dois levantamentos, os resultados consideram-se positivos.

Foi ainda possível analisar a capacidade dos

Visualizando a nuvem de pontos gerada pela *Scanstation P40*, verifica-se que os pequenos objetos existentes no fundo estão perfeitamente representados na nuvem de pontos obtida pelo equipamento. O sondador multifeixe também revelou boa capacidade para deteção dos mesmos objetos. Considerando as limitações inerentes à propagação do som na água e à resolução espacialdo transdutor, o EM3002 teve um bom desempenho pois, conforme ilustrado na figura 6, detetou sondas mínimas de objetos de pequenas dimensões.

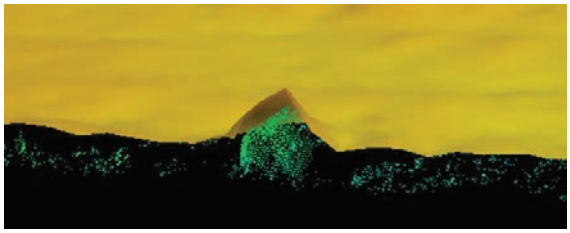


Fig. 6. Superficie CUBE sobreposta com a nuvem de pontos do laser scanner. A sonda mínima deste objeto, com cerca de 0,30 m de altura, foi detetada pelo multifeixe.

4. CONCLUSÕES

A realização deste estudo evidencia que a integração de sistemas LiDAR terrestre em LTH constitui uma solução válida para levantamentos em águas muito pouco profundas, particularmente quando uma busca total do fundo é necessária, em zonas entremarés, confinadas e de pequena dimensão, onde sistemas de LiDAR aéreo ou mesmo drones poderão eventualmente não ser soluções proveitosas. A sua portabilidade, eficiência e elevada qualidade, apresentam-se como mais-valias em levantamentos em zonas mais remotas ou inacessíveis a uma embarcação. Contudo, este tipo de sensores não possui a capacidade de penetrar na água pelo que, em zonas que não ficam a descoberto na baixa-mar, terá de ser empregue um sondador acústico.

Para o IH, após considerados os fatores relacionados com o cumprimento dos requisitos impostos pela Publicação Especial S-44 (OHI, 2008), a tecnologia LiDAR terreste poderá ser aplicada essencialmente em três tarefas:

- realização de LTH em zonas entremarés;
- aquisição de dados altimétricos em praias ou áreas adjacentes a LH realizados no mar;
- obtenção de coordenadas de ajudas à navegação, ou estruturas portuárias e costeiras com interesse para o navegador, que sejam de difícil acesso.

5. TRABALHO FUTURO

Os resultados obtidos permitem definir como objetivos futuros a avaliação da adaptação de sistemas LiDAR terrestres móveis - *Mobile Mapping* a bordo de embarcações de sondagem (figura 7). A integração destes equipamentos com os sensores inerciais e de posicionamento associados a um SMF instalado na mesma embarcação permite, em simultâneo com a aquisição de dados hidrográficos, gravar informação detalhada relativa a estruturas portuárias adjacentes à área de sondagem, perfil da linha de costa ou realizar aquisição de dados altimétricos em zonas de difícil acesso, minimizando riscos, desgaste e os custos associados aos trabalhos neste tipo de locais.



Fig. 7. Exemplo do sistema Mobile Mapping Leica Pegasus, instalado numa embarcação (XYHT, 2016).

REFERÊNCIAS

Calder, B. e Wells, D. (2007). *CUBE User's Manual*, University of New Hampshire.

CARIS (2016). *CARIS HIPS and SIPS 9.0.22 (User Guide)*. CARIS.

Kongsberg (2005). *EM3002 Multibeam echo sounder (Product Description)*. Kongsberg Maritime AS. 27 pp.

Kongsberg (2006). *Seapath 200 RTK (Datasheet)*. Kongsberg Seatex AS

Leica Geosystems (2015). *Leica Scanstation P30/40 (Because Every Detail Matters)*. Leica Geosystems AG.

Leica Geosystems (2016). *Leica Cyclone User Manual*. Leica Geosystems AG.

Vicente, J., Sanches, P. e Monteiro, C. (2012). Multibeam Data Processing using CUBE surfaces for Nautical Cartography and Dredged Measurements. *2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, 35-38.

XYHT (2016). *http://www.xyht.com/hydromarine/a-shore-thing/*. XYHT, consultada em 4 de maio de 2016.

OHI (2008). *S-44 IHO Standards for Hydrographic Surveys (5ª Ed.)*, Organização Hidrográfica Internacional.

A Cartografia Hidrográfica da Via Navegável do Douro

J. Vicente (1), J. Coutinho (2), P. Costa (3)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa; delgado.vicente@hidrografico.pt

(2) Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, SA.

(3) Marinha Portuguesa.

Resumo: A Via Navegável do Douro (VND), com cerca de 210 km de extensão, é uma das vias de comunicação, de transporte e de desenvolvimento mais importante de Portugal.
Sob a gestão da Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, SA (APDL) tem sido promovida e incentivada a navegação desta Via, assumindo o Instituto Hidrográfico (IH), através do acordo de cooperação institucional, um papel fundamental na aquisição de informação batimétrica e de dados ambientais que vão permitir a elaboração de estudos e de cartas hidrográficas, essenciais para o projeto "*Douro's Inland Waterway 2020*" e, consequentemente, para o reforço das condições de segurança e de gestão da navegação.
O objetivo da presente comunicação consiste em divulgar as atividades do IH no âmbito do projeto de desenvolvimento da VND, com particular incidência nos levantamentos hidrográficos realizados para a produção de cartografia hidrográfica oficial.

Palavras-chave: Via Navegável do Douro, levantamentos hidrográficos, cartografia hidrográfica oficial.

1. INTRODUÇÃO

O Acordo de Cooperação Institucional existente entre o IH e a APDL (IH e IMT, 2015; Decreto-Lei n.º 83/2015, de 21 de maio) contempla, sucintamente, os seguintes trabalhos e estudos:

- Levantamentos topo-hidrográficos (LTH);
- Estudo do assinalamento fluvial;
- Cartografia fluvial;
- Estudo do melhoramento do posicionamento;
- Estudo da medição e difusão de alturas de água.

A informação de base topográfica e hidrográfica permite caracterizar morfologicamente o fundo do rio sendo fundamental para a elaboração dos restantes projetos e estudos, nomeadamente, os respeitantes aos trabalhos de alargamento e/ou aprofundamento de alguns troços da VND.

A presente comunicação respeita aos LTH já realizados pelo IH no âmbito do projeto da VND. Os levantamentos iniciaram-se no final de junho de 2015 e prolongaram-se por 3 meses, nas albufeiras da Régua, Valeira, Pocinho e no estuário. Em 2016 serão realizados os levantamentos das albufeiras de Crestuma e do Carrapatelo. O projeto prevê ainda a repetição de levantamentos nas zonas a intervencionar.

2. TRABALHOS REALIZADOS

Os levantamentos na VND iniciaram-se em finais de junho de 2015. Primeiramente, foi efetuado o levantamento da Albufeira da Régua no seu troço crítico, entre o Pinhão e a Valeira, troço onde a profundidade do canal de navegação é menor. Este trabalho decorreu entre 1 e 23 de julho. Seguidamente os trabalhos estenderam-se à albufeira da Valeira (entre 24 de julho e 10 de agosto) e, posteriormente, à albufeira do Pocinho (entre 11 e 22 de agosto). No regresso à Régua, até 11 de setembro, realizou-se o troço entre o Pinhão e a eclusa da Régua. Entre 11 e 27 de setembro, a equipa da BH desceu ao estuário para realizar este levantamento. Para 2016, entre maio e junho, está prevista a conclusão dos trabalhos com o levantamento das albufeiras de Crestuma e do Carrapatelo. Do trabalho já realizado há a destacar os elementos constantes na tabela I.

Tabela I. Trabalho de campo realizado em 2015.

Data de início dos trabalhos de campo	29-06-2015
Data de fim dos trabalhos de campo	27-09-2015
Dias de trabalho de campo	83
Apoio / Topografia	
Dias ocupados no apoio	12
Dias ocupados na topografia	53
Dias na coordenação de ajudas à navegação	9
Hidrografia	
Tempo total de sondagem	566 horas
Tempo total de navegação	715 horas
Distância percorrida sobre perfis	2 935 km
Área sondada	39,3 km^2
Nº de sondas adquiridas	**3,6 mil milhões**
Volume de informação	1,5 TB

2.1. Ligação aos sistemas de referência

O posicionamento das embarcações de sondagem foi garantido por sistemas *Differential Global Navigation Satellite System* (DGNSS) com receção de correções diferenciais via satélite, método que

rentabilizou a aquisição de dados. Esta era uma questão preocupante durante o planeamento de trabalhos em virtude da orografia, da falta de acessibilidades e da inexistência de comunicações em muitos troços do rio. Os trabalhos de topografia utilizaram a informação da Rede Nacional de Estações Permanentes (ReNEP) para ligar os trabalhos aos sistemas de referência nacionais.

Altimetricamente, os trabalhos de topografia foram referenciados ao Nível Médio do mar Adotado (NMA). As profundidades foram referidas ao Zero Hidrográfico (ZH) no Estuário e, nas albufeiras, à cota mínima de exploração (CMinE). A redução das sondas observadas ao *datum* vertical foi efetuada com a medição dos níveis de água por marégrafos instalados em diversos pontos ao longo de cada troço de sondagem. A ligação dos marégrafos e de pontos de apoio (transporte de cotas) à Rede de Nivelamento Geométrico de Alta Precisão (RNGAP) foi efetuada, sempre que possível (por exemplo no Pinhão – figura 1), a partir de nivelamentos geométricos. A inexistência de marcas de nivelamento, próximas dos locais de instalação da maioria dos marégrafos, obrigou a realizar o transporte de cota com recurso a observações GNSS de longa duração e de dupla frequência, utilizando mais uma vez, a informação disponível da ReNEP para o processamento dos dados.



Fig. 1. Nivelamento geométrico no Pinhão.

2.2 Topografia e ajudas à navegação

Foi efetuada a topografia de estruturas portuárias, rampas de acesso ao rio, pontes, postes de alta tensão, eclusas e área envolvente às barragens, afloramentos rochosos, etc. Os trabalhos de topografia basearam-se em observações com equipamentos *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e com estação total. Como exemplo, a figura 2 ilustra a coordenação de um ponto para apoio à topografia da eclusa da Valeira.

De igual modo foi efetuada a observação da posição e características das ajudas à navegação (farolins, balizas e boias).

O rio contém diversos perigos ocultos para a navegação, sobretudo para a realização dos trabalhos hidrográficos (figura 3). Existem troços com diversos afloramentos rochosos que, ora estão cobertos ora estão visíveis consoante o nível de água. Assim, no início de levantamento de cada albufeira foi solicitado à empresa Energias de Portugal (EDP) a descida do nível de água para a CMinE de modo a permitir topografar o máximo de rochas. Esta tarefa foi essencial para garantir a segurança das embarcações de sondagem pois, para rentabilizar os trabalhos de hidrografia, os níveis de águas de troços críticos (como por exemplo, entre a Valeira e Cotas) foram subidos para valores próximos da cota máxima de exploração em articulação com a EDP.



Fig. 2. Coordenação de um ponto de apoio na barragem da Valeira a partir de observações GNSS.



Fig. 3. Reconhecimento e topografia de afloramentos rochosos com bote.

2.3 Hidrografia

O levantamento hidrográfico (LH) decorreu nos seguintes moldes:

- Com sondador multifeixe (SMF), garantindo os requisitos de ordem especial no canal de navegação e em áreas críticas importantes para a navegação local e adjacentes ao canal;
- Com sondador interferométrico (SINF), garantindo os requisitos de ordem 1a, em áreas onde a aquisição de informação batimétrica não foi considerada crítica para a segurança da navegação;
- Com sondador de feixe simples (SFS), garantindo os requisitos de ordem 1b, em áreas de profundidade reduzida, onde as embarcações não tiveram condições para operar em segurança.

Os requisitos das ordens dos LH encontram-se definidos em OHI (2008). A figura 4 ilustra uma das embarcações de sondagem utilizadas.



Fig. 4. Embarcação de sondagem na Albufeira da Valeira.

Na execução dos levantamentos optou-se por uma sobreposição entre faixas sondadas (nos SMF e SINF) superior a 50%, garantindo que um mesmo local fosse sondado pelo menos duas vezes em circunstâncias diferentes. Esta opção foi essencial para garantir a busca total do fundo em fundos de elevada irregularidade, assim como, percecionar a adequabilidade da redução da sondagem de maré com recurso às leituras dos marégrafos instalados.

3. CARTOGRAFIA HIDROGRÁFICA

Em virtude do volume e densidade de informação, o processamento dos dados adquiridos requer algoritmos para processamento automático. O IH implementou em 2011 (Vicente *et al.*, 2012) o algoritmo *Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator* (CUBE), publicado por Calder e Wells (2007). Para a utilização deste algoritmo é requerido o conhecimento da incerteza horizontal e vertical de cada sonda observada, a eliminação de erros grosseiros (por exemplo, deteções de profundidade devido a esteiras de navios) e a minimização de erros sistemáticos (por exemplo, erros nas medições devidos a variações da velocidade de propagação do som ou desvios de orientação entre sensores). Ao hidrógrafo compete analisar visualmente e estatisticamente os resultados da estimação da profundidade pelo algoritmo nos nodos de uma superfície (modelo batimétrico - MB) e, designar manualmente, quando necessário, as profundidades mínimas que garantam a segurança da navegação.

Dos vários tipos de dados adquiridos foram gerados os seguintes 5 MB:

- SMF e SINF: MB CUBE com resolução de 0,5 m;
- SFS, topografia e sondas designadas: MB com 1 m de resolução (sonda mínima na posição processada).

No seguimento deste processamento, os 3,6 mil milhões de sondas adquiridas foram utilizadas para originar 150 milhões de profundidades alocadas aos 5 MB referidos. Para permitir uma gestão mais eficaz dos dados, no final, foi efetuada a junção dos 5 conjuntos num único MB de resolução de 1 m, reduzindo para 27 milhões de profundidades a informação a utilizar para a produção da cartografia hidrográfica e para alimentação de bases de dados.

As figuras 5 a 8 ilustram diversas visualizações dos MB gerados.

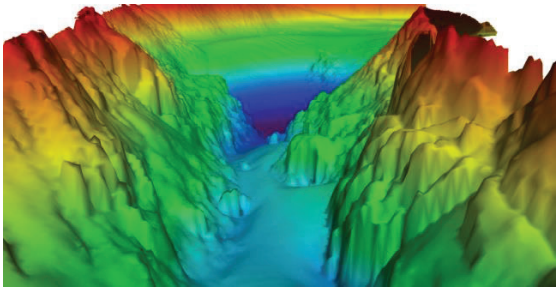


Fig. 5. Imagem batimétrica da área do Cachão da Valeira.

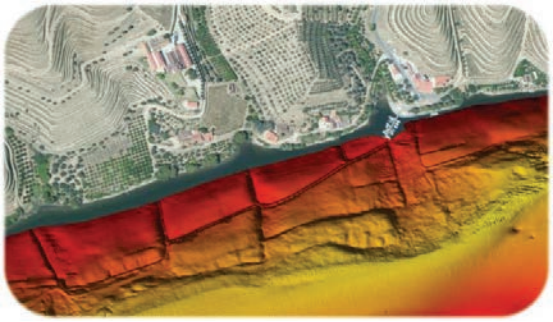


Fig. 6. Imagem batimétrica com o relevo de socalcos submersos.

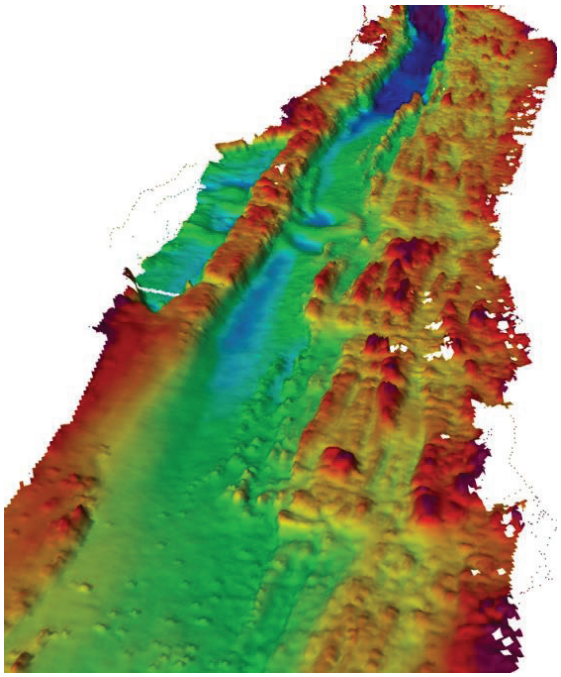


Fig. 7. Imagem batimétrica do canal de navegação na zona do Tua.

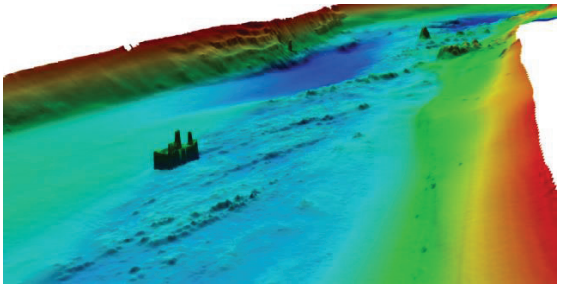


Fig. 8. Imagem batimétrica de uma embarcação naufragada na zona da Senhora da Ribeira.

As implantações gráficas (IG) do levantamento foram elaboradas à escala 1:2 000 com as dimensões

de 800 por 600 mm, perfazendo um total de 142 IG de sondagem e topografia. Foram igualmente elaboradas IG com as mesmas características com a representação da informação dos MB.

Para além da informação referida, foram elaborados ficheiros AUTOCAD com a representação, através de polígonos, das diferentes classificações do LH (ordens especial, 1a e 1b), fichas de pontos coordenados dos pontos de apoio e das ajudas à navegação, esquemas de nivelamento dos nivelamentos geométricos efetuados, ficheiros de desenho assistido por computador dos objetos e estruturas topografadas, gráficos de níveis de água correspondentes às observações dos marégrafos instalados, esquemas altimétricos das pontes e eclusas com a informação de profundidades e alturas disponíveis para os navegantes.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A VND (APDL, 2015 e 2016) apresenta, atualmente, um elevado interesse nos mais diversos setores da sociedade e de relevância estratégica para Portugal. Com o seu canal de navegação, com cerca de 210 km de extensão permite, desde 1990, a navegação desde a Barra até Barca de Alva. No entanto, quer a procura económica quer a necessidade de garantir melhores condições de segurança, obrigam a estudos de alargamento e de aprofundamento da Via. Com a navegação local em franco crescimento, nomeadamente ao nível turístico, chegando a ter navios com quase 80 m de comprimento a transportar 350 passageiros, mas também ao nível comercial, com a possibilidade de expansão da navegação mercante, mormente com a viabilidade da ligação a Espanha e a eventual concretização da indústria de extração de minério de Moncorvo, a VND assume-se como uma via de comunicação estratégica para Portugal.

A necessidade de garantir a segurança da navegação, com a produção de um fólio de cartografia fluvial oficial, com o melhoramento e otimização do assinalamento marítimo e do posicionamento dos navios e com a necessidade de conhecer em tempo real os níveis de água, nomeadamente, nos troços críticos para a navegação, justificam os estudos e projetos do "*Douro's Inland Waterway 2020*" (APDL, 2015).

O IH é a entidade responsável pela produção de cartografia hidrográfica oficial de Portugal. Os levantamentos realizados pelo IH obedecem criteriosamente às especificações da OHI relativas à condução de LH para produção de cartografia náutica da série fluvial. Os equipamentos utilizados pelo IH permitem a aquisição de batimetria de elevada resolução com busca total do fundo. Estes factos fazem do IH um parceiro estratégico no âmbito deste projeto.

Atualmente, um sistema de navegação é composto por recursos que permitem monitorizar as condições meteorológicas e ambientais, integradas em sistemas de informação geográfica, nos quais se inclui a informação cartográfica e, principalmente, a informação batimétrica, tendo em consideração as características dos navios, a sua posição e atitude, de modo a garantir uma navegação segura.

No entanto, a otimização das vias de transporte e fortalecimento do seu conhecimento, pode por um lado assegurar uma maior capacidade de navegabilidade, permitindo resguardos de navegação menores, mas, por outro lado, obriga a um conhecimento mais detalhado de todas as variáveis em tempo real. Neste sentido, o incremento dos riscos possibilitado pelo incremento do conhecimento do meio marinho ou fluvial, deve garantir:

- A existência de infraestruturas, meios e equipamentos que permitam uma monitorização e controlo adequados;
- Uma cadeia de comando, controlo, comunicações, informação (monitorização, aquisição e processamento de dados e reconhecimento);
- Levantamentos batimétricos regulares de elevada resolução;
- Monitorização das variáveis ambientais;
- Assinalamento marítimo e cartografia náutica.

É nos últimos três tópicos referidos que o IH se posiciona, tendo em consideração a sua missão, e como objetivo claro de contribuir para a segurança da navegação, sob o lema bem assinalado neste projeto "Conhecer o Douro para que todos o possam usar em segurança".

REFERÊNCIAS

APDL (2016a). Sítio da internet com informação e dados da VND disponível em http://douro.apdl.pt/.

APDL (2016b). Sítio da internet com informação do projeto Douro's Inland Waterway 2020 disponível em http://www.diw2020.pt/.

Calder, B. e Wells, D. (2007). CUBE User's Manual. *University of New Hampshire*.

IH e IMT (2015). Acordo de Cooperação Institucional entre o Instituto da Mobilidade e dos Transportes e o Instituto Hidrográfico, 27 de maio de 2015.

OHI (2008). S-44 IHO Standards for Hydrographic Surveys. *Organização Hidrográfica Internacional*. 5ª Ed..

Vicente, J.; Silva, R.; Sanches, P. e Arenga, M. (2012). Revisão das Especificações Técnicas para a execução de Levantamentos Hidrográficos. *2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. Instituto Hidrográfico.

Apoio à decisão para a ativação da Equipa Hidrográfica de Intervenção Rápida na busca de objetos

M. Miranda (1) J. Vicente (1), e F. Ferreira (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49 1249-093 Lisboa; marina.miranda@hidrografico.pt

Resumo: O Instituto Hidrográfico criou, em 2013, a Equipa Hidrográfica de Intervenção Rápida (EH-IR), sendo acionada sempre que requerida uma resposta rápida e multidisciplinar em situações de calamidade, catástrofe e emergência, ou na compilação e caraterização de informação oceanográfica, hidrográfica, geológica e geofísica para apoio a operações navais. A EH-IR é uma equipa que reúne valências técnicas da Brigada Hidrográfica e das diversas Divisões do Instituto Hidrográfico. Maioritariamente, as situações em que a EH-IR tem sido ativada correspondem a ocorrências onde é necessária a busca de objetos e/ou a avaliação da segurança da navegação. Com base na experiência acumulada e nos possíveis cenários, é objetivo da presente comunicação estabelecer um plano de ação que permita optimizar a capacidade de resposta.

Palavras-chave: EH-IR, sistema multifeixe, sonar lateral, busca de objetos, segurança da navegação.

1. INTRODUÇÃO

A Equipa Hidrográfica de Intervenção Rápida (EH-IR) é uma equipa que reúne as valências da Brigada Hidrográfica (BH) e das diversas divisões do Instituto Hidrográfico (IH), sendo acionada sempre que requerida uma resposta rápida e multidisciplinar em situações de calamidade, catástrofe e emergência, ou na compilação e caraterização de informação oceanográfica, hidrográfica, geológica e geofísica para apoio a operações navais.

Nos últimos anos, diversas equipas do IH foram empenhadas em cenários de crise. Para fazer face a essas solicitações, o IH criou, em 2013, a EH-IR. Nas Jornadas Hidrográficas de 2014 foi apresentado uma comunicação sobre a EH-IR, as suas capacidades, organização e cenários de operação (Vicente *et al.*, 2014).

Atualmente, a EH-IR consta do plano operacional da Marinha, com uma prontidão de 48 horas.

Desde a sua criação, a EH-IR já foi ativada sete vezes, tendo tido como objetivo a busca de objetos e a segurança da navegação. Os empenhamentos da EH-IR foram os seguintes:

- Busca de aeronave ao largo da Baleeira;
- Deteção de sondas mínimas em Viana do Castelo;
- Busca de destroços de uma embarcação ao largo da Praia das Maçãs;
- Busca de aeronave no rio Tejo, na zona da Trafaria (figura 1);
- Busca de viaturas na ria de Aveiro (duas situações);
- Busca de destroços do arrastão "Olívia Ribau" na Figueira da Foz (figura 2).

A presente comunicação aplica-se à busca de objetos e segurança da navegação, em águas interiores ou de aproximação aos portos, onde, em regra, são utilizados os sistemas do IH instalados em meios próprios ou de oportunidade.

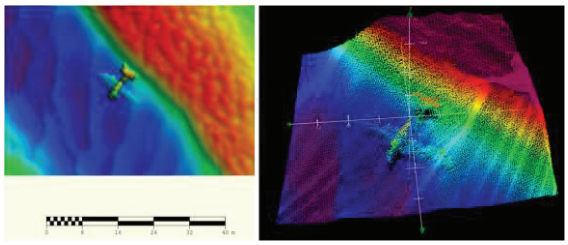


Fig. 1. Imagens batimétricas da aeronave sinistrada no Rio Tejo.

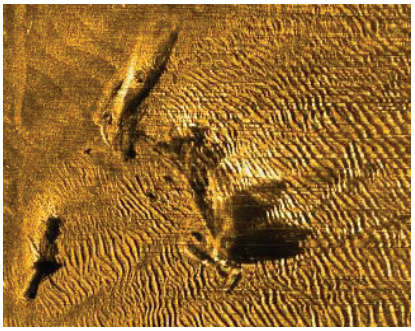


Fig. 2. Imagem de sonar lateral dos destroços da embarcação Olívia Ribau (redes, portas de arrasto e pórtico).

2. FATORES DE PLANEAMENTO

Depois de ser ativada a EH-IR é necessário definir que recursos serão utilizados (humanos, meios e equipamentos). Este empenhamento depende dos seguintes fatores, inerentes ao cenário de intervenção da EH-IR:

(i) Para a seleção dos meios:

- Existência de meios locais de oportunidade;
- Distância ao local e tempo de mobilização dos meios do IH;
- Adequabilidade dos meios do IH ao cenário;
- Urgência na mobilização;
- Condições meteo-oceanográficas.

(ii) Para a seleção dos equipamentos:
- Profundidade;
- Cenário (deteção de objetos e/ou segurança da navegação);
- Capacidade de deteção, função das características técnicas dos equipamentos relativamente aos objetos a detetar, nomeadamente a sua dimensão;
- Morfologia do fundo;
- Disponibilidade dos equipamentos;
- Condições para operar em segurança os equipamentos (essencial em equipamentos rebocados);
- Dimensão da área de buscas (pode ser necessário empenhar mais de um meio e diversos equipamentos).

A definição das áreas de buscas e a forma como elas são efetuadas estão dependentes do cenário, realçando-se apenas os seguintes aspetos: incerteza da posição inicial de buscas, condições meteo-oceanográficas e eventual deriva, etc.

No caso de busca de objetos, todos os contactos detetados pelos sistemas são classificados, tendo em consideração o tamanho e a forma do objeto que se pretende detetar. Os contactos que sejam classificados como sendo possíveis necessitarão de ser investigados, pelo *Remotely Operate Vehicle* (ROV) ou por mergulhadores, para se identificar se correspondem ao objeto que se pretende localizar.

A figura 3 representa as diferentes fases da busca de objetos.

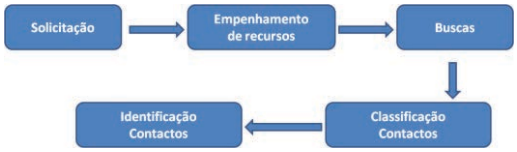


Fig. 3. Fases da busca de objetos.

3. MEIOS

O IH tem ao seu dispor duas lanchas costeiras, cinco embarcações portuárias, semirrígidas, botes e uma mota de água. Estes meios são utilizados pela EH-IR, e quando necessário, podem ser utlizadas embarcações de oportunidade.

Os navios hidrográficos são utilizados quando é necessário fazer a projeção da EH-IR e dos seus meios através do mar.

Na seleção de meios do IH há a considerar as condicionantes expressas na tabela I.

Tabela I. Condicionantes nos meios do IH.

Meios	Condicionantes
Lanchas costeiras	Deslocação até ao local efetuada por mar a uma velocidade média de 8 nós, com condições meteo-oceanográficas favoráveis
Embarcações portuárias	Necessário recorrer a camião externo para transporte
Semirrígidas, botes e mota de água	Sem condicionantes

4. EQUIPAMENTOS

Os equipamentos a selecionar para uma determinada ação têm em consideração os fatores de planeamento mencionados no parágrafo 2. Para tal é necessário conhecer as principais características de cada equipamento utilizável.

Na fase de busca os equipamentos mais utilizados pela EH-IR têm sido os sondadores multifeixe (SMF) e os sonares de pesquisa lateral (SL). Pode ser ainda utilizado o sonar interferométrico (SINF) em águas muito pouco profundas.

Para além da urgência da mobilização, outro dos fatores mais relevantes é a capacidade de deteção. Neste aspeto, uma diferença considerável entre os sistemas é a resolução espacial. No caso dos SMF e do SINF (instalação é no casco) a resolução espacial está dependente da profundidade, enquanto no SL (quando rebocado) a resolução é dependente da altitude do sonar ao fundo.

4.1. Sistema sondador multifeixe

O SMF é um sistema acústico de elevada resolução, que permite a busca total do fundo com elevada densidade de medições e, consequentemente, a produção de modelos batimétricos de elevada resolução. O SMF permite ainda a aquisição de informação de retrorefletividade do fundo marinho (para caracterização dos diferentes tipos de sedimentos superficiais) e da informação de retrorefletividade da coluna de água.

O IH opera os SMF KONGSBERG EM 3002 (Kongsberg, 2006) e KONGSBERG EM 2040C (Kongsberg, 2013) em baixas profundidades.

4.1.1. KONGSBERG EM 3002 (EM 3002)

Existem no IH dois SMF EM 3002. Estes sistemas só podem ser operados em meios com energia de bordo ou alternativamente com geradores portáteis, pelo que, não são utilizados em semirrígidas ou botes. A instalação do sistema nas embarcações do IH demora, em média, um dia, tempo que pode aumentar consideravelmente se for utilizada uma embarcação de oportunidade.

As suas principais caraterísticas são as seguintes:
- Frequência (kHz): 300;
- Nº de sondas por impulso: 254;
- Faixa sondada: 130º e alcance (m): 1 – 100.

4.1.2. KONGSBERG EM 2040C (EM 2040C)

O outro sistema compacto que existe no IH é SMF EM 2040C. Este, é instalado da mesma forma que o SMF EM 3002, pelo que os tempos de instalação e condicionantes são iguais.

As suas principais caraterísticas são as seguintes:
- Frequência (kHz): 200 – 400;
- Nº de sondas por impulso: 400;
- Faixa sondada: 130º e alcance (m): 0,5 – 250.

4.2. Sonar interferométrico

O IH tem um SINF, o Geoswath 500+ (Kongsberg, 2012). Este sondador batimétrico de alta resolução, agrega a mais-valia inerente a um sonar lateral com a possibilidade de adquirir dados batimétricos ao longo de uma faixa de sondagem ampla. É, normalmente, utilizado em águas muito pouco profundas, onde os SMF deixam de ser rentáveis. Relativamente aos SMF apresentam como desvantagem maiores dispersão e incerteza na medição da profundidade.

As suas principais caraterísticas são as seguintes:
- Frequência (kHz): 500;
- Largura da faixa sondada: até 7 vezes a profundidade;
- Profundidade máxima de operação (m): 50.

4.3. Sonar lateral

O SL é um sistema acústico de elevada resolução que é geralmente rebocado próximo ao fundo (em regra, a altitude ao fundo é cerca de 10% do alcance lateral utilizado) a partir de uma embarcação.

O IH tem dois SL que podem ser utilizados pela EH-IR, o KLEIN 3900 (L-3 Klein, 2007a) e o KLEIN 5000 (L-3 Klein, 2007b).

4.3.1. KLEIN 3900

O sonar KLEIN 3900 é um sistema portátil de elevada mobilidade, com um único feixe, de elevada resolução e utilizado em missões de busca. Este modelo tem duas frequências selecionáveis. Os 445 kHz oferecem um excelente alcance e resolução e os 900 kHz oferecem uma resolução mais elevada.

Alternativamente ao reboque, este sistema pode ainda ser utilizado numa estrutura fixa na embarcação quando a operar em águas muito pouco profundas.

As suas principais caraterísticas são as seguintes:
- Frequência de 445 kHz: alcance de 50 m, 60 m, 75 m e 40 cm de resolução; alcance de 100 m e 55 cm de resolução;
- Frequência de 900 kHz: alcance de 10 m, 20 m, 30 m e 40 m e 21 cm de resolução;
- Velocidade de operação entre 3 e 6 nós;
- Cabo de reboque com 50 m;
- Operação até aos 30 m de profundidade.

4.3.2. KLEIN5000

O sonar KLEIN 5000 é um sistema digital que emite cinco feixes em simultâneo, o que permite a operação a maiores velocidades (velocidade máxima na ordem dos 10 nós). Os feixes são focados dinamicamente, garantindo uma resolução elevada e constante ao longo de todo o alcance do sonar. A melhor resolução que se pode obter com este sistema é de 7,5 x 10 cm até um alcance de 75 m. Este é o sistema de excelência para a deteção de objetos no

As suas principais caraterísticas são as seguintes:
- Frequência: 455 kHz;
- Modo de elevada resolução: alcance de 50 m e 75 m e 10 cm de resolução;
- Modo de resolução normal: alcance de 50 m e 75 m e 20 cm de resolução; e alcance de 100 m e 25 cm de resolução;
- Alcance máximo de operação: 100 m (200 m de largura da faixa);
- Reboque: dois guinchos eletro-hidráulicos com comprimento de cabo de 250 m e 750 m;
- Operação máxima limitada até aos 200 m de profundidade (90 m nas lanchas do IH).

4.4. Magnetómetro

O magnetómetro é utilizado para deteção de objetos com assinatura magnética, nomeadamente, em locais onde a eficácia dos sondadores multifeixe ou dos sonares laterais seja menor, por exemplo, localização de pequenos objetos em fundos muito irregulares ou objetos já cobertos por camadas sedimentares.

Este sistema opera normalmente até aos 200 m de profundidade.

4.5. Remotely Operated Vehicle

O ROV é um veículo subaquático, controlado remotamente, que permite a observação remota do fundo do mar e estruturas submarinas. A ligação entre o veículo e a superfície é assegurada por um cabo umbilical que permite a comunicação bidirecional, assim como o transporte de energia para o veículo.
A utilização do ROV permite a operação a maiores profundidades e durante um período mais prolongado do que seria conseguido com recurso a mergulhadores. Além disso, é possível a operação em águas contaminadas que representem um risco para a vida humana.

As suas principais caraterísticas são as seguintes:
- Câmaras de vídeo a cores e a preto e branco e projetores;
- Garra para manipulação de pequenos objetos;
- Altímetro, profundímetro, sensores de cabeceio e balanço;
- Sonar de varredura circular para navegação (300-670 kHz) e câmara acústica (900 kHz) para operação em zonas de elevada turbidez;
- Posicionamento acústico;
- Operação até 3,5 nós de corrente (velocidade máxima de 5 nós) e 200 m de profundidade (350 m de cabo).

4.6. Informação da Coluna de água

Existem situações em que a informação batimétrica não é suficiente para determinar a sonda minima e consequentemente, garantir a segurança da navegação. Nessas situações pode-se recorrer aos

Estes dados correspondem aos valores de retrorefetividade captados pelos SMF durante a aquisição de dados batimétricos.

Outra mais-valia na utilização dos dados da coluna de água é a capacidade de deteção de objetos que se encontrem ao longo da coluna de água (entre transdutor e fundo).

No caso dos SMF, os dados da coluna de água encontram-se, tal como os dados batimétricos, georreferenciados.

Em virtude da resolução dos SL, objetos localizados na coluna de água podem ser visualizados na imagem acústica (figura 4).

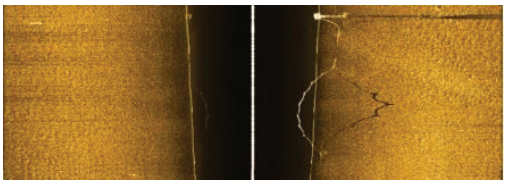


Fig. 4. Imagem de sonar lateral com deteção de objetos na coluna de água (cabos e boia).

5. APOIO À DECISÃO

Tendo em consideração os equipamentos/ sistemas existentes no IH, bem como os meios que tem ao seu dispor, pretende-se otimizar a resposta da EH-IR às solicitações que são efetuadas ao IH.

De forma a otimizar o tempo de resposta da EH-IR foi criada uma tabela (tabela II) com as principais capacidades e limitações de cada sistema.

Tabela II. Capacidades e limitações dos sistemas.

	Capacidades de deteção		Resolução	Mobilidade	Limitações
	Imagem acústica	Profundidade			
SL 3900	Elevada	NIL	Melhor que 1% da altitude do peixe	Elevada	Instalação de casco: profundidades até 30 m e velocidades de 3 a 5 nós
SL 5000					Maior incerteza no posicionamento dos contactos na forma rebocada
					A partir dos 30 m é necessário guincho electro-hidráulico e grua ou pórtico
SMF 3002	Reduzida	Até 80 m	Pior que 2% da profundidade	Reduzida	Deteção diminui com a profundidade
SMF 2040C		Até 250 m			
SINF	Elevada	Até 30 m	Melhor que 1% da profundidade		

Tendo presente a tabela anterior com as principais capacidades dos sistemas e, considerando os cenários em que a EH-IR é normalmente acionada (busca de objetos e segurança da navegação), foi elaborada uma tabela de apoio à decisão (tabela III) em função da profundidade a que os sistemas vão operar.

Tabela III. Tabela de apoio à decisão para baixas profundidades em função do cenário versus profundidade.

	Até 05 m	05 – 25 m	25 – 50 m
Busca de objetos	SL KEIN 3900	SL KEIN 3900	SL KEIN 5000
Segurança da navegação	SINF	SMF	SMF

Pode ainda ser utilizado o magnetómetro nos locais onde a eficácia dos sondadores multifeixe ou dos sonares laterais seja menor.

Esta tabela de apoio à decisão serve para identificar os sistemas utilizados na classificação de contactos. Para a identificação dos contactos é necessário recorrer aos mergulhadores ou efetuar operações com o ROV. Na escolha entre os mergulhadores e o ROV há a considerar:

- Nas operações com mergulhadores a partir dos 40 m de profundidade é necessário ter médico e câmara hiperbárica no local e o mergulho pode ser efetuado até aos 81 m de profundidade.
- Nas operações com ROV é necessário estar a operar a partir de um navio com posicionamento dinâmico ou num navio/ embarcação fundeado (limitado a condições favoráveis).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tabela de apoio à decisão apresentada aplica-se em zonas de aproximação a portos ou zonas interiores, locais onde são utilizados os sistemas do IH em meios próprios ou de oportunidade.

Esta tabela é meramente indicativa, pelo que sempre que existir uma solicitação de ativação da EH-IR o cenário deve de ser analisado e deve de ser verificado se os sistemas definidos nesta tabela se adequam.

REFERÊNCIAS

IH (2013): "IP.OR.03 – A Equipa Hidrográfica de Intervenção Rápida", Instituto Hidrográfico, 2013.

Kongsberg (2006): "EM 3002 Multibeam echo sounder - Revision E", Kongsberg Maritime.

Kongsberg (2013): "EM 2040C Multibeam echo sounder - Revision A", Kongsberg Maritime.

Kongsberg (2012): "GeoSwath Plus", Kongsberg Geoacustics.

L-3 Klein (2007a): "Series 3900 Sonar Manual – Revision 00", L-3 Communications Klein Associates, Inc.

L-3 Klein (2007b): "Series 5000 Sonar Manual – Revision 13.0", L-3 Communications Klein Associates, Inc.

Vicente, J., M. Arenga, C. Marques, M. Miranda e J. Cruz (2014): "A Equipa Hidrográfica de Intervenção Rápida", 3as *Jornadas de Hidrografia*, Instituto Hidrográfico.

A retroreflexão acústica na coluna de água como apoio ao controlo de qualidade da informação batimétrica

P. Carvalho (1), T. Dias (1), C. Marques (2), J. Vicente (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº49, 1249-093. teixeira.carvalho@marinha.pt; geraldes.dias@hidrografico.pt.

(2) Comando Operacional da Madeira, Pico da Cruz-S. Martinho, Ap. 2832-9001-601 Funchal.

Resumo: Os dados de retroreflexão acústica na coluna de água, provenientes de levantamentos hidrográficos com sistemas sondadores multifeixe, representam ainda um desafio computacional, embora contenham informação com reconhecido potencial e aplicação. Este trabalho tem como objetivo utilizar a informação da coluna de água como apoio ao controlo de qualidade da informação batimétrica fornecida pela deteção do fundo. A importância deste controlo torna-se evidente quando o objetivo do levantamento é a segurança da navegação, por exemplo, na determinação da sonda mínima sobre *wrecks* ou na definição de vertentes abruptas. Nesse sentido, foi desenvolvido um algoritmo que, para cada *ping*, calcula um novo perfil batimétrico, baseado nos dados de retrorefletividade da coluna de água. Posteriormente, são avaliadas as diferenças entre os dois perfis, tendo em consideração a máxima incerteza vertical admissível, e identificados os perfis que necessitam de avaliação por parte do hidrógrafo no respetivo software de processamento.

Palavras-chave: levantamento hidrográfico, sondadores multifeixe, coluna de água, deteção do fundo, retroreflexão acústica.

1. INTRODUÇÃO

A informação da retroreflexão acústica na coluna de água (*Water Column* - WCL), proveniente de levantamentos hidrográficos (LH) com sistemas sondadores multifeixe (SMF), tem revelado um crescente leque de oportunidades e desafios na interpretação e utilização dos dados adquiridos. No entanto, o excessivo volume de dados e a ausência de aplicações informáticas que permitam uma análise fluida e objetiva, constitui ainda um obstáculo fundamental à sua utilização para fins concretos e produtivos por parte dos hidrógrafos (Gee *et al.*, 2012).

Assim, o objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de um algoritmo capaz de utilizar a informação da coluna de água como apoio ao controlo de qualidade da informação batimétrica fornecida pela deteção do fundo. Esse controlo torna-se particularmente útil nas situações onde a deteção do fundo pode ter um desempenho menos eficaz, quando o objetivo do levantamento é a segurança da navegação: na determinação da sonda mínima sobre *wrecks* (ex: navios afundados do rio Tejo (Marques *et al.*, 2014)) ou na definição de vertentes abruptas (ex: levantamento hidrográfico do rio Douro (Vicente *et al.*, 2016)) (Clarke, 2006).

2. ALGORITMO

2.1 Objetivo

O desenvolvimento do algoritmo teve como principal objetivo calcular um perfil batimétrico, para cada *ping* (impulso), com base nos dados adquiridos da WCL (P_{WCL}). Esse perfil é posteriormente comparado com o perfil batimétrico determinado pelo algoritmo de deteção do fundo do SMF (P_{SMF}), identificando os *pings* onde os perfis sejam díspares em valores superiores à máxima incerteza vertical admissível (*Total Vertical Uncertainty* - TVU) do LH (OHI, 2008), permitindo uma análise objetiva na ferramenta *Swath Editor* do software *CARIS HIPS and SIPS* (CARIS, 2016).

2.2 Metodologia

Tendo em consideração o enorme volume de informação associado à aquisição de dados da WCL, bem como a complexidade da análise e do cálculo envolvidos, o desenvolvimento do algoritmo teve como premissa primordial a minimização do tempo de computação. A título de exemplo, uma fiada do SMF *Kongsberg EM2040C* (*Kongsberg*, 2015), com apenas 1 min e 40 s, numa profundidade média de 8 m, registou 2805 *pings*. Cada *ping* é constituído por 256 feixes e cada feixe contém cerca de 646 valores de retrorefletividade (amostras) (Vicente, 2011). Assim, neste caso, é necessário analisar 463 879 680 valores da WCL (2805 x 256 x 646) para obter 718 080 valores de profundidade (2805 x 256) (Tabela I).

Tabela. I. Matriz de retrorefletividade (dB). As células a amarelo representam a amostra que identifica o fundo.

	Nº feixe				
Nº da amostra no feixe	1	2	...	255	256
1	-128	-128		-128	-128
2	-128	-128		-128	-128
...					
301	-20	-6		-10	-10
302	-9	-8		-13	-13

Inicialmente, foi necessário identificar os datagramas que possuíam informação útil para o algoritmo, a fim de graficar os valores de retrorefletividade e o perfil determinado pela deteção do fundo do equipamento. Devido à geometria dos feixes, cada amostra (*sample*) possui uma determinada resolução, dependente do ângulo do feixe. Assim, em função do ângulo de cada feixe, criou-se uma matriz com os valores de distância transversal (*across track*) (x) e de profundidade (y), aos quais se fez corresponder os respetivos valores de retrorefletividade (dB), tornando-se possível graficá-los para cada *ping* (Fig. 1).

Seguidamente, foi necessário graficar, no mesmo referencial, o perfil batimétrico determinado pelo algoritmo de deteção do fundo (P1), utilizando o datagrama XYZ.

Mantendo como premissa a minimização do tempo de computação, procurou-se abrir o menor número possível de datagramas. Nesse sentido, verificou-se que o datagrama *Water Column* (WCD), continha informação suficiente, sendo apenas necessário convertê-la em metros através de uma equação (*Kongsberg*, 2015), obtendo-se outro perfil batimétrico (P2).

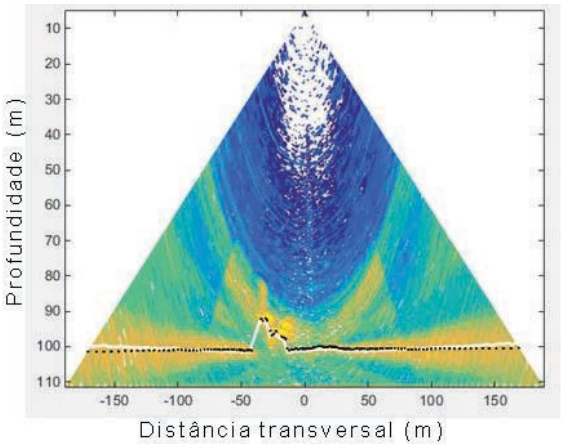


Fig. 1. Retrorefletividade da coluna de água e perfis batimétricos do datagrama XYZ (P1 - branco) e WCD (P2 - preto).

Comparando os dois perfis (P1 e P2), concluiu-se que as diferenças entre as profundidades obtidas nos dois datagramas eram mínimas. No entanto, o datagrama WCD apresentava algumas amostras sem informação, que foram colmatadas com informação das amostras do feixe adjacente (interpolação). Deste modo, foi possível obter toda a informação necessária a partir de um único datagrama.

Finalmente, foi definido o limite, baseado na TVU do LH, a partir do qual as diferenças entre os dois perfis (P_{WCL} e P_{SMF}) seriam assinaladas.

2.3 Deteção do fundo na coluna de água

Na análise da amplitude do sinal foram consideradas três técnicas: *threshold* (limiar de deteção), maior pico filtrado e centro de massa. Uma vez que já se possuía um valor de referência, determinado pelo algoritmo de deteção do fundo, e se pretendia uma deteção mais sensível, o *threshold* foi seleccionado em detrimento das restantes.

O *threshold* foi então concebido para se adaptar aos valores de cada aquisição, preferencialmente diferente para cada *ping*, devido à variabilidade da retrorefletividade da WCL em função do SMF utilizado, do intervalo de profundidades, do tipo de sedimentos, da presença de diferentes massas de água, etc. Assim, uma vez que existem dois modos de deteção (em amplitude e em fase), o *threshold* foi definido com base nos valores das amostras que representam o fundo nos feixes centrais. Esta técnica foi testada com bons resultados para os feixes centrais (Fig. 2). Para os feixes exteriores, uma vez que os lóbulos laterais (*side lobes*) aumentam significativamente o nível de ruído, foi necessário ajustar o *threshold* em função de uma variável configurável (Fig. 3). No entanto, verificou-se existir dificuldade na deteção de objetos nos feixes exteriores.

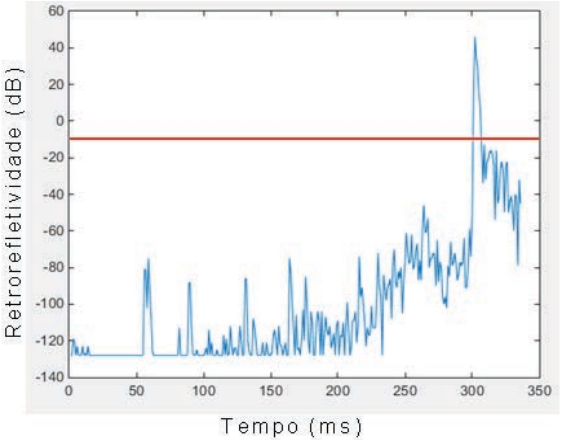


Fig. 2. Registo de retrorefletividade, em função do tempo, de um feixe central. O fundo é identificado facilmente, correspondendo a um máximo em amplitude. A linha horizontal vermelha corresponde a uma deteção utilizando, por exemplo, um threshold de -10 dB.

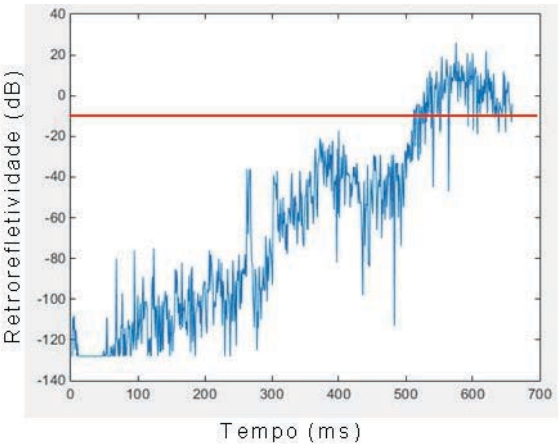


Fig. 3. Registo de retrorefletividade, em função do tempo, de um feixe exterior. Neste caso, os lóbulos laterais alcançam primeiro o fundo, tornando menos evidente a deteção do fundo pelo lóbulo principal. A linha horizontal vermelha corresponde a uma deteção utilizando o mesmo threshold de -10 dB.

O algoritmo contabiliza as deteções dos feixes de cada *ping*, assinalando-o temporariamente, caso obtenha mais de 30 deteções. A consistência dessas deteções é então avaliada, analisando os 3 *pings* seguintes e consecutivos. Caso estes também apresentem mais de 30 deteções, o perfil correspondente ao primeiro *ping* é assinalado para verificação posterior por parte do hidrógrafo (Fig. 4).

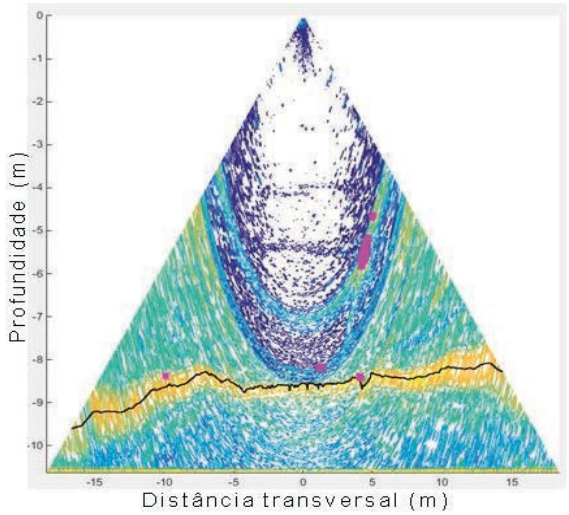


Fig. 4. Deteção de um cabo a EB (magenta) na coluna de água.

2.4 Integração no software de processamento

O algoritmo foi desenvolvido com o objetivo de fornecer informação diretamente aplicável no software de processamento *CARIS HIPS and SIPS*.

Assim, o algoritmo identifica onde existem diferenças superiores à TVU entre ambos os perfis (P_{WCL} e P_{SMF}), por fiada (*line*) e ping (*profile*). Essa indexação permite, através da ferramenta *Swath Editor* do referido software, visualizar graficamente o *ping* identificado pelo algoritmo, avaliar a informação disponível e, em caso de a deteção de um eventual objeto ser considerada válida, exportar os novos valores de profundidade como *additional bathymetry* (Fig. 5). Posteriormente, é possível designar as respetivas sondas, através da aplicação *Subset Editor*.

A aplicação permite seleccionar uma ou várias fiadas simultaneamente, indicando numa *listbox*, no final da análise de cada fiada, o número de deteções por *ping* e os *pings* que devem ser verificados.

Adicionalmente, destacam-se as seguintes opções e configurações:

- *Ping* Duplo: esta opção permite reduzir para metade o tempo de processamento, caso as condições de sondagem sejam favoráveis, efetuando a análise apenas de dois em dois *pings*. Nas experiências efetuadas, verificou-se que, quando existe uma deteção, ela é em norma consistente, repetindo-se em 5 a 10 *pings* adjacentes;

- Visualização: esta janela permite a visualização gráfica na aplicação. A visualização encontra-se separada da deteção porque aumenta consideravelmente o tempo de computação, proporcional à qualidade da visualização: 10, visualização rápida e fraca resolução; 50, visualização lenta e boa resolução;

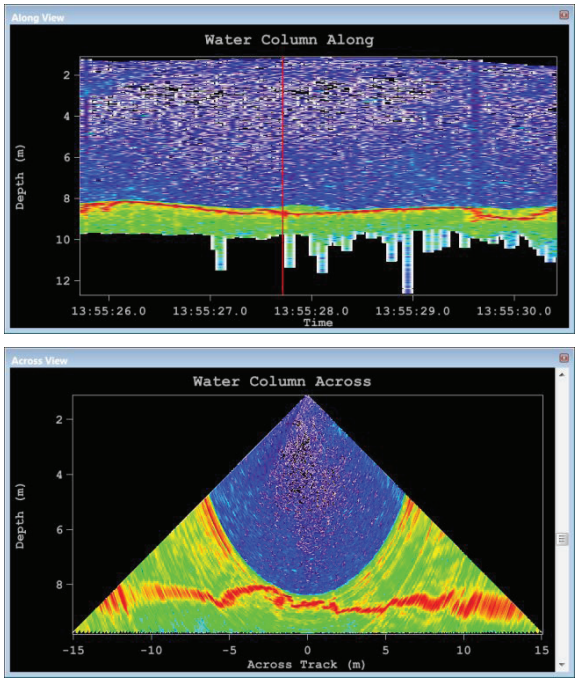


Fig. 5. Vista da informação da coluna de água ao longo da fiada (along track), com seleção específica do perfil 50 (linha vertical vermelha) e respetiva vista across track (CARIS, 2016).

3. APLICAÇÃO

Foi desenvolvida uma aplicação em *MATLAB*, baseada no algoritmo, executável em ambiente *Windows* e testada nos *SMF Kongsberg EM2040C* e *EM710* (Fig. 6).

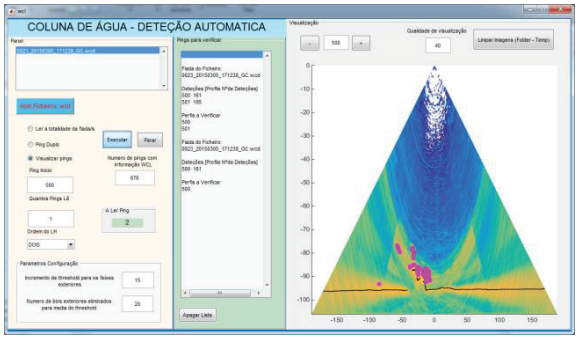


Fig. 6. Interface gráfico da aplicação.

- Incremento de *threshold* para os feixes exteriores: aumenta o *threshold* para os feixes exteriores, a fim de minimizar falsas deteções;

- Número de feixes exteriores eliminados para a média do *threshold*: este parâmetro funciona como um ajuste fino, permitindo definir manualmente o intervalo de feixes centrais a utilizar, uma vez que a informação do modo de deteção não está disponível no datagrama WCD;

- Ordem do LH: permite a seleção da TVU, em função da ordem do LH.

A aplicação permite ainda que o algoritmo seja aplicado à totalidade da fiada ou a determinado intervalo de *pings*.

4. CONCLUSÃO

A informação da retroreflexão acústica na coluna de água, proveniente de LH com SMF, encerra diversas potencialidades, carecendo ainda de análise mais aprofundada e desenvolvimento de aplicações.

Atualmente, a principal limitação à sua utilização prende-se com o volume de dados e com a integração da informação, dispersa por diversos datagramas, exigindo uma computação complexa e prolongando o respetivo processamento.

No desenvolvimento deste algoritmo demonstrou-se ser possível, através de um processo semi-automático, efetuar o controlo de qualidade da informação batimétrica, no que respeita a um eventual desempenho menos eficaz da deteção do fundo do SMF, direccionando a análise do hidrógrafo para áreas específicas de um LH.

Foi ainda demonstrado que essa análise se torna menos efetiva nos feixes exteriores, comprovando a importância do procedimento em vigor de efetuar fiadas com sobreposição de 50% (200% de cobertura) no caso de LH para deteção de objetos, nomeadamente, de pequena dimensão.

A aplicação desenvolvida constitui uma primeira versão de uma ferramenta que se pode tornar bastante útil no processamento de dados hidrográficos por parte do hidrógrafo. Como trabalho futuro a desenvolver, apontam-se as seguintes linhas de ação:

- Transição para uma linguagem de programação mais rápida e de utilização livre;

- Utilização dos restantes datagramas, para obtenção de mais informação (perfil batimétrico, modo de deteção, fator de qualidade) sem degradação da velocidade de computação. Neste âmbito, seria interessante correlacionar as deteções deste algoritmo com o fator de qualidade (Ladroit *et al.*, 2012), procurando melhorar a sua robustez;

- Foram verificadas algumas falsas deteções relacionadas com a *minimum slant range* (MSR) (Fig. 7). A deteção de objetos nesta zona é comprometida pela influência dos lóbulos laterais. Apesar de ser possível eliminar estas deteções, com base na distância vertical ao fundo, eventuais objetos reais podem ser dissimulados. Uma solução a aprofundar passaria por analisar a forma do feixe (*beam pattern*) (Marques, 2013).

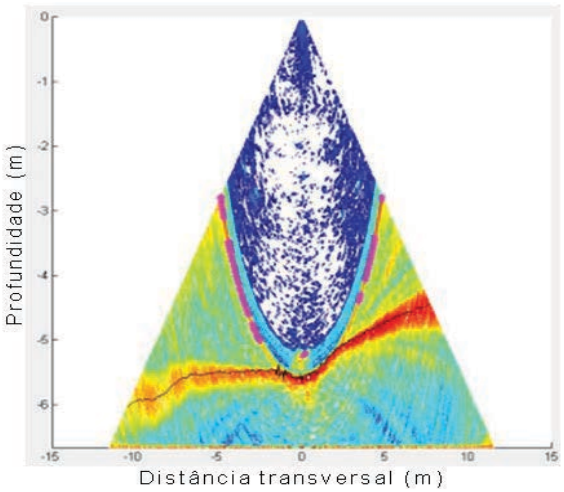


Fig. 7. Deteções ao longo da MSR.

REFERÊNCIAS

CARIS (2016). CARIS HIPS and SIPS 9.1, User Guide. CARIS.

Clarke, H. (2006). Applications of multibeam water column imaging for hydrographic survey. The Hydrographic Journal.

Gee, L., Doucet, M., Parker, D., Weber, T., Beaudoin, J. (2012). Is Multibeam Water Column Data Really Worth the Disk Space? Hydro12 - Taking care of the sea.

Kongsberg (2015). Kongsberg EM Series Multibeam echo sounder, EM datagram formats. Kongsberg Maritime AS.

Ladroit, Y., Lurton, X., Sintès, C., Augustin, J., Garello, R. (2012). Definition and application of a quality estimator for multibeam echosounders. Oceans 2012.

Marques, C. (2013). Automatic mid-water target detection using multibeam water column. University of New Brunswick.

Marques, C., Monteiro, C., Almeida, R., Vicente, J. (2014). Visualização de navios afundados pela retroreflexão acústica na coluna de água. 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Instituto Hidrográfico.

Organização Hidrográfica Internacional (2008). S-44 IHO Standards for Hydrographic Surveys. 5.ª Edição.

Vicente, J. (2011). Modelação de dados batimétricos com estimação de incerteza. Faculdade de Ciências. Universidade de Lisboa.

Vicente, J., Coutinho, J., Costa, P. (2016). A Cartografia Hidrográfica da Via Navegável do Douro. 4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Instituto Hidrográfico. (Em publicação.)

Incerteza de um levantamento hidrográfico: adequabilidade da utilização de fiadas de verificação para inferência estatística em áreas de declive acentuado

T. Dias (1), C. Monteiro (1), J. Vicente (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa; geraldes.dias@hidrografico.pt

Resumo: Nos levantamentos hidrográficos para compilação de cartografia náutica, a verificação do cumprimento das especificações definidas pela Organização Hidrográfica Internacional, baseia-se na estimação da incerteza através de dois métodos: balanço de incertezas e análise estatística. No rio Douro existem áreas caracterizadas por declives acentuados, que inviabilizam a definição em simultâneo das incertezas máximas admissíveis (vertical e horizontal) e limitam a análise estatística como método de estimação da incerteza. Assim, este trabalho tem como objetivo relacionar incerteza vertical, incerteza horizontal e declive, e evidenciar a limitação do método estatístico, nomeadamente, na comparação entre os dados obtidos com as fiadas principais e as fiadas de verificação de sondagem, resultando que esse método não seja adequado em áreas com declive superior a determinado ângulo ou na definição de um parâmetro, a somar à máxima incerteza vertical admissível, que reflita a variação de profundidade esperada em função do declive e da resolução horizontal.

Palavras-chave: levantamento hidrográfico, incerteza, S-44, TVU, THU, análise estatística.

1. INTRODUÇÃO

A publicação especial *International Hydrographic Organization Standards for Hydrographic Surveys* (S-44) (OHI, 2008) classifica os levantamentos hidrográficos (LH), entre outras especificações, em função das respetivas incertezas máximas admissíveis: vertical (*Total Vertical Uncertainty* - TVU) e horizontal (*Total Horizontal Uncertainty* - THU).

A incerteza é intrínseca à medição de qualquer quantidade física e pode ser definida como um intervalo, em torno de um valor e com determinado nível de confiança, que contém o valor verdadeiro de uma medição. Nesse sentido, a incerteza de uma medição pode derivar das características da grandeza medida, da precisão dos equipamentos utilizados ou das condições verificadas durante a medição (Taylor, 1997).

No caso dos LH com sistema sondador multifeixe (SSMF), a TVU e a THU de cada sonda, podem ser calculadas através de um modelo matemático que efetua um balanço assente nas diversas fontes de incerteza associadas à determinação da profundidade (Hare *et al.*, 1995). Com base nesses valores de TVU e THU, o algoritmo *Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator* (CUBE) (Calder e Wells, 2007), em uso no Instituto Hidrográfico (IH) (Vicente *et al.*, 2012) estima o valor da incerteza vertical propagada (*Total Propagated Uncertainty* - TPU) para cada nodo.

Por outro lado, a incerteza pode também ser estimada com base na dispersão estatística em torno do valor medido, por exemplo, através da comparação dos valores das sondas reduzidas das fiadas de verificação de sondagem (FVS) com as profundidades estimadas por um modelo batimétrico (MB) do tipo CUBE, gerado apenas com as sondas reduzidas das fiadas principais de sondagem (FPS).

Ambos os métodos devem ser entendidos como complementares, uma vez que a incerteza obtida em cada um deles é distinta, assim como as limitações da respetiva estimação.

Atualmente, os dois métodos são utilizados na verificação do cumprimento das especificações dos LH (IH, 2014), sendo que os valores de incerteza dos nodos da superfície final são os maiores entre TPU estimada pelo CUBE e o desvio padrão (σ) das sondas contribuintes para o valor estimado da profundidade nodal, propagado a um nível de confiança de 95% (1,96 σ, para uma dimensão, assumindo uma distribuição normal dos dados).

Assim, este trabalho tem como objetivo caracterizar a incerteza de um LH, distinguindo os dois tipos de estimativa, e apresentar as limitações no cálculo e análise do método estatístico, em função do declive (α) da área sondada.

2. CÁLCULO DA INCERTEZA

Nos SSMF a profundidade não é determinada através de uma única medição direta. Pelo contrário, é necessário medir uma série de parâmetros referenciados em tempo (velocidade de propagação do som, intervalo de tempo decorrido entre a transmissão e a receção do sinal acústico, posição e atitude da embarcação, etc.) que permitem, posteriormente, o cálculo do traçado do raio acústico e a determinação da profundidade. Assim, a estimação da TVU e da THU de cada sonda cumpre duas etapas: a estimação da incerteza individual de

cada medição e como esta se propaga através do modelo matemático que permite determinar a profundidade.

O método assente no balanço de incertezas (Hare *et al.*, 2011) estima a TVU e a THU distintamente (Bartlett e Hare, 2011) para cada sonda, e encontra-se implementado no software *CARIS HIPS and SIPS* v.9.1.1 (CARIS, 2016), constituindo um elemento fundamental no desempenho do algoritmo CUBE. Este método pode basear-se em valores estáticos (predefinidos) ou variáveis em função das condições verificadas em tempo real (Foster *et al.*, 2014). Consequentemente, a incerteza final torna-se dependente da estimação e introdução correta dos referidos valores de incerteza individual.

Esta dependência revela a complementaridade do método estatístico na estimação da incerteza, uma vez que este se baseia, não numa previsão, mas numa análise direta dos resultados obtidos.

Atualmente, em levantamentos de ordem especial (OE) (OHI, 2008) é requirida uma sobreposição de 50% entre FPS (200% de cobertura) (Vicente *et al.*, 2012), resultando numa elevada densidade de dados e conferindo maior consistência à modelação batimétrica. Conjuntamente, à medida que o número de sondas por unidade de área aumenta, também a estimação da incerteza baseada na dispersão estatística se torna mais robusta, apesar de se encontrar condicionada, entre outros factores, pelo α da área sondada.

3. S44: TVU e THU

A classificação dos LH em conformidade com a publicação especial S-44 baseia-se na definição das respetivas incertezas máximas admissíveis (TVU e THU). Estes requisitos mínimos foram definidos pela Organização Hidrográfica Internacional (OHI) para LH cujo principal objetivo é a compilação de cartografia náutica (CN), tendo em consideração a segurança da navegação, e são adequados para a maioria das zonas navegáveis, em função do tipo de navegação esperada (OHI, 2008).

Assim, a título de exemplo, numa área de sondagem com profundidade de 10 m, um LH apenas cumpre OE se tiver TVU < 0,26 m e THU < 2,0 m (Fig. 1).

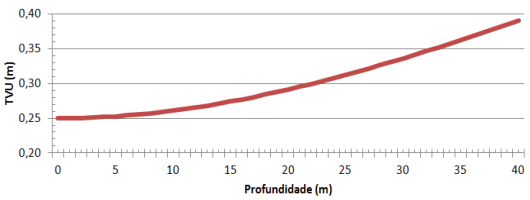


Fig. 1. TVU de um LH de OE. A TVU depende da profundidade, enquanto que a THU é um valor constante de 2,0 m.

No entanto, em função do α da área de sondagem, a TVU e a THU são interdependentes. Se considerarmos apenas a dimensão da THU que se desenvolve ao longo da maior variação do α, torna-se evidente que uma determinada incerteza horizontal, implica uma determinada incerteza vertical, tanto maior quanto maior o α. Esta relação pode ser ilustrada, concebendo as duas incertezas como os catetos de um triângulo retângulo (Fig. 2).

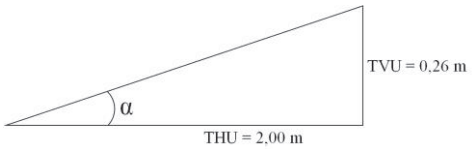


Fig. 2. TVU e THU como os catetos de um triângulo retângulo, em que a hipotenusa representa o perfil do fundo.

Nesse sentido, numa área de sondagem com profundidade de 10 m, se a THU = 2,0 m e o α > 7,44º, a variação de profundidade será superior a 0,26 m, excedendo, por si só, a TVU para um LH de OE. Analogamente, para um fundo com α fixo (25º) e a mesma profundidade de 10 m, terá que se garantir THU < 0,56 m, a fim de se obter uma variação de profundidade inferior a 0,26 m, que não exceda a TVU e garanta a OE (Tab. I).

Tabela I. Relação entre TVU, THU e α: α em função da TVU e da THU; THU em função da TVU e do α.

Profundidade	TVU	THU	α	TVU	α	THU
5 m	0,25 m	2,0 m	7,20º	0,25 m	25,0º	0,54 m
10 m	0,26 m	2,0 m	7,44º	0,26 m	25,0º	0,56 m
20 m	0,29 m	2,0 m	8,29º	0,29 m	25,0º	0,63 m

O α da área de sondagem é algo predefinido, inerente à respetiva morfologia do fundo. Assim, uma vez que, conforme demonstrado, em função desse α, a TVU e a THU são interdependentes, não se justifica que os respetivos valores máximos admissíveis sejam definidos simultaneamente, sendo mais adequado definir apenas um deles como condição.

Nesse sentido, podem ser seguidas duas linhas de acção, tendo em consideração o objetivo do LH.

Na primeira, fixa-se a TVU, garantindo sempre um máximo de acordo com a OE, e a THU torna-se uma função da TVU e do α. Dado que, quando $\alpha \rightarrow 0º$, $THU \rightarrow +\infty$ e, quando $\alpha \rightarrow 90º$, $THU \rightarrow 0$, importa definir-lhe um limite máximo (2,0 m, considerado um valor de referência para a navegação) e mínimo (não inferior à resolução espacial do SMF). Este tipo de especificação implica um posicionamento horizontal rigoroso e uma boa resolução espacial do SMF que, embora possa encarecer significativamente o LH, poderá justificar-se, por exemplo, para apoio a obras marítimo-portuárias.

Em alternativa, fixa-se a THU, garantindo sempre um máximo de 2,0 m, e a TVU torna-se uma função da THU e do α. Aqui assume-se que, para profundidades de 10 m e para α > 7,44º, em função da THU, a TVU poderá ser superior a 0,26 m. Este tipo de especificação implica que o sopé ou o bordo de um talude possa variar horizontalmente 2,0 m, comprometendo o posicionamento do valor de profundidade, tanto mais crítico quanto maior o α (Fig. 3). Apesar de ser uma solução menos rigorosa que a primeira, é definitivamente menos

dispendiosa, e poderá ser aceitável, por exemplo, em LH cujo principal objetivo seja a compilação de CN.

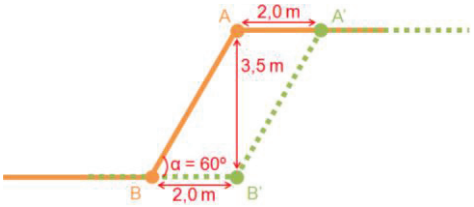


Fig. 3. Efeito de uma incerteza horizontal de 2,0 m no posicionamento de um talude com α = 60º. Numa situação limite, em que o fundo real seja o representado a laranja e o fundo detetado pelo SSMF seja o representado a verde, à posição A será atribuída a profundidade da posição B', com uma diferença de 3,5 m. No entanto, o valor da profundidade da posição A, será preservado na posição A', ou seja, a profundidade mínima é garantida na CN, embora apresente um erro horizontal de 2,0 m.

Os valores de incerteza apresentados dizem respeito, em regra, a um nível de confiança de 95%. Assim, o cálculo do α da superfície de sondagem deve também ter em consideração esta percentagem, ou seja, voltando ao exemplo inicial, se em apenas 5% da superfície o α > 7,44º e a THU = 2,0 m, o cumprimento da OE não será comprometido, em regra, pelo α (Tab. II).

Tabela II. Percentagem de nodos cujo cumprimento da OE não será comprometido pelo α, para dois valores de THU (valor máximo admissível e valor de referência intermédio).

LH	Prof.	THU = 2,0 m	THU = 0,50 m
Lisboa (Barra Sul)	16,72 m	98,26% (α < 7,96º)	99,95% (α < 29,22º)
Portimão	8,05 m	92,05% (α < 7,33º)	99,53% (α < 27,22º)
V. R. Santo António	6,23 m	95,23% (α < 7,25º)	99,81% (α < 26,96º)
Vila do Porto (Açores)	16,31 m	50,71% (α < 7,92º)	93,36% (α < 29,10º)
Rio Douro (Valeira)	13,78 m	54,90% (α < 7,70º)	90,80% (α < 28,41º)

4. CORRELAÇÃO ENTRE INCERTEZA E DECLIVE DA ÁREA SONDADA NO MÉTODO ESTATÍSTICO

A estimativa da incerteza através da comparação entre os dados obtidos com as FPS e as FVS, apresenta uma limitação crescente à medida que a superfície CUBE gerada com os dados das FPS não representa fielmente as irregularidades do fundo. Ou seja, a dispersão das sondas face ao valor de profundidade estimado no nodo, pode na verdade refletir a realidade, apesar de, em função do α do nodo, poder exceder a TVU e comprometer a análise estatística como método de verificação do cumprimento das especificações da S-44. Assim, quanto menor o α do nodo e melhor a resolução da superfície, menor a limitação do método estatístico (Fig. 4 e 5). No entanto, a resolução da superfície encontra-se limitada pela profundidade e resolução espacial do SMF (Vicente, 2011).

5. CASO DE ESTUDO

A correlação entre a incerteza e o α da área sondada foi verificada numa zona do estreito do Saião, localizado no rio Douro (Fig. 6 e 7) (Vicente *et al.*, 2016):

- Resolução da superfície CUBE: 0,50 m;
- Profundidade média: 20,03 m;
- α médio: 33,85º.

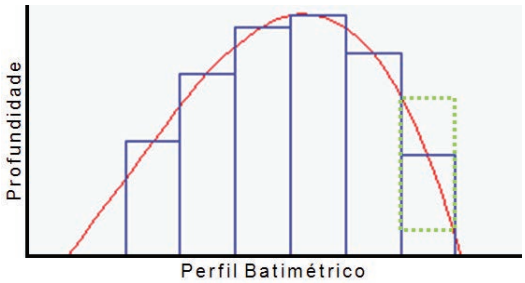


Fig. 4. A linha vermelha representa o perfil do fundo e as barras azuis representam os nodos da superfície CUBE. Num SSMF ideal (sem incerteza na determinação da profundidade), as sondas vão estar dispostas ao longo da linha vermelha. Dentro de cada nodo (retângulo verde) existirá uma dispersão de sondas, tanto maior quanto maior o α e pior a resolução.

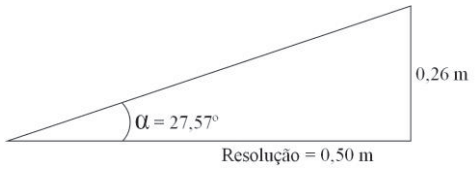


Fig. 5. Incerteza vertical esperada, tendo em consideração a resolução da superfície CUBE e o α da área de sondagem. Numa profundidade de 10 m, este (0,26 m) é o valor de referência para a TVU, significando que, para α > 27,57º, a análise estatística, como método de verificação do cumprimento das especificações da S-44, poderá estar em causa.

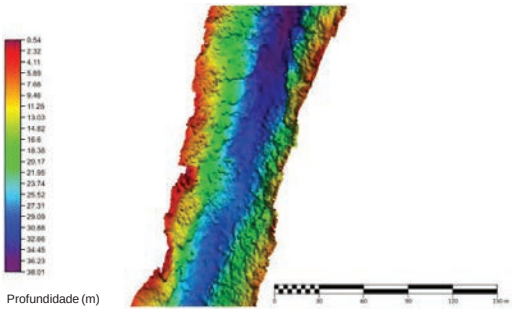


Fig. 6. Modelo batimétrico da área de estudo (profundidade entre 0,54 m e 36,23 m).

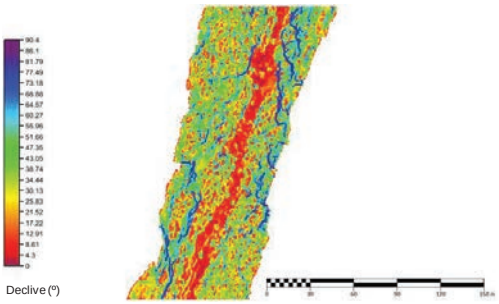


Fig. 7. Declive da área de estudo, entre 0º e 86,10º.

Tendo em consideração a resolução de 0,50 m do MB e a máxima TVU admissível para cumprimento da OE (aproximadamente, 0,29 m para uma profundidade média de 20,03 m), a análise estatística apenas será aplicável em nodos com α < 30,26º, devido à variação de profundidade dentro do nodo provocada somente pelo α.

Verificou-se que apenas 47,47% dos nodos do MB possuíam α < 30,26º. Não obstante, a estatística entre FPS e FVS do MB, obteve 191 999 comparações, das quais 49,22 % cumpriam OE.

Por outro lado, a definição do σ propagado das sondas contribuintes para o valor estimado da profundidade nodal, como incerteza final de um nodo, quando superior à TPU estimada pelo CUBE, assenta no mesmo princípio estatístico, encontrando-se também dependente do α (Fig. 8 e Tab. III).

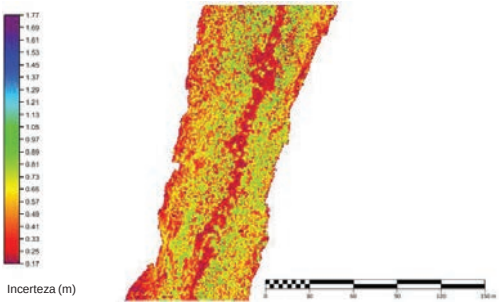


Fig. 8. Incerteza final da área de estudo, entre 0,17 m e 1,69 m. Em função da profundidade, a máxima TVU admissível varia entre 0,25 m e 0,37 m.

*Tabela III. Incerteza final de dois nodos. O nodo A apresenta um α = 17,35º e a incerteza final resulta da TPU estimada pelo CUBE (0,23 m), uma vez que o σ propagado (0,08*1,96 = 0,16 m) é inferior. O nodo B apresenta um α = 47,84º e a incerteza final resulta do σ propagado (0,33*1,96 = 0,65 m), uma vez que a TPU estimada pelo CUBE (0,20 m) é inferior. O nodo A cumpre a máxima TVU admissível especificada na S-44 e o nodo B não.*

Data	Nodo A	Nodo B
Densidade de sondas	21	36
Profundidade	32,84 m	13,04 m
α	17,35º	47,84º
σ	0,08 m	0,33 m
TPU	0,23 m	0,20 m
Incerteza final	0,23 m	0,65 m
TVU (S-44)	0,35 m	0,27 m

6. CONCLUSÃO

A estimação da incerteza de um MB é fundamental para garantir a sua qualidade e adequabilidade.

O balanço de incertezas constitui um método *a priori*, procurando avaliar se as condições do LH (meios e equipamentos utilizados, métodos adotados, características da área de sondagem), permitem o cumprimento das especificações. A análise estatística constitui um método *a posteriori*, procurando avaliar se a estimação inicial foi cumprida. A robustez do segundo método depende da eliminação efetiva de erros grosseiros e sistemáticos, mas também do α. Embora o desconhecimento prévio da geomorfologia da área de sondagem não permita incluir o α na estimação inicial, ele deve ser considerado na estimação final (Monahan e Wells, 2000).

Assim, o método estatístico deve ser aplicado com reserva, na verificação do cumprimento das especificações da S-44. Caso contrário, dois LH idênticos em todos os aspectos, exceto no α da área de sondagem, podem ser classificados em ordens diferentes (Monahan e Wells, 2000).

Conforme analisado no caso prático, é possível determinar um valor de α, a partir do qual, em função da resolução horizontal, é expectável que a variação de profundidade exceda a TVU. Neste caso, o método estatístico pode adotar um dos seguintes procedimentos:

- Não ser considerado aplicável para nodos com α superior ao ângulo determinado;

- Definir um parâmetro, a somar à TVU especificada na S-44, que reflita a variação de profundidade esperada em função do α e da resolução horizontal.

O α da área de sondagem constitui ainda um mecanismo de controlo de qualidade do método estatístico para estimação da incerteza, devendo ser calculado em todos os LH.

Uma nova edição da S-44 deve ter em consideração o α e a interdependência que ele pode provocar nas respetivas especificações.

REFERÊNCIAS

Bartlett, J., Hare, R. (2011). Solving the Uncertainty Management Puzzle. *Hydro International*.

Calder, B., Wells, D. (2007). CUBE User's Manual, Version 1.13. *University of New Hampshire*.

CARIS (2016). CARIS HIPS and SIPS 9.1 User Guide. *CARIS*.

Foster, B., Hart, K., Froelich, G., Lamey, B. (2014). Enhanced Total Propagated Uncertainty (TPU) in CARIS HIPS and SIPS. *Canadian Hydrographic Conference*.

Hare, R., Eakins, B., Amante, C. (2011). Modelling Bathymetric Uncertainty.

Hare, R., Godin, A., Mayer, L. (1995). Accuracy Estimation of Canadian Swath (Multi-beam) and Sweep (Multitransducer) Sounding Systems. *Canadian Hydrographic Service*.

Instituto Hidrográfico (2014). Procedimento de Trabalho - Processamento de dados SMF. Instituto Hidrográfico.

Monahan, D., Wells, D. (2000). IHO SP 44 Standards for Hydrographic Surveys and the demands of the new century. *Ocean Mapping Group*. *University of New Brunswick*.

Organização Hidrográfica Internacional (2008). S-44 IHO Standards for Hydrographic Surveys. 5.ª Edição.

Taylor, John R. (1997). An Introduction to Error Analysis - The Study of Uncertainties in Physical Measurements. Second Edition. *University Science Books*.

Vicente, J. (2011). Modelação de dados batimétricos com estimação de incerteza. Faculdade de Ciências. Universidade de Lisboa.

Vicente, J., Silva, R., Sanches, P., Arenga, M. (2012). Revisão das Especificações Técnicas para a execução de Levantamentos Hidrográficos. 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica.

Vicente, J., Coutinho, J., Costa, P. (2016). A Cartografia Hidrográfica da Via Navegável do Douro. 4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Instituto Hidrográfico. (Em publicação.)

A utilização de imagens de satélite multiespectrais de elevada resolução espacial para a derivação de batimetria

R. Guerreiro (1), A. Moura (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49 1249-093 Lisboa. xavier.guerreiro@hidrografico.pt.

Resumo: A derivação de batimetria a partir de imagens de satélite é um tema que tem vindo a ganhar relevância nas comunidades técnica, científica e empresarial, ligadas à hidrografia e à deteção remota. Foi neste contexto que se iniciaram, no Instituto Hidrográfico, estudos sobre a aplicabilidade de metodologias de derivação de batimetria por satélite. Os primeiros estudos pretenderam implementar e operacionalizar a metodologia e foram realizados com recurso a imagens multiespectrais do satélite Landsat 8, tendo sido adquirida alguma experiência nesta matéria.
Com a disponibilização das imagens do satélite Sentinel 2A, no âmbito do Programa Copernicus, e com a oportunidade da utilização de imagens de elevada resolução espacial do satélite Kompsat-3, cedidas pelo *Korea Aerospace Research Institute*, foi possível apresentar as mais-valias e constrangimentos resultantes da aplicação da metodologia já desenvolvida.

Palavras-chave: Hidrografia, imagens multiespectrais, deteção remota, derivação de batimetria.

1. INTRODUÇÃO

A procura de técnicas alternativas aos levantamentos hidrográficos (LH) tradicionais para o aumento do conhecimento de áreas nos mares e oceanos onde a informação hidrográfica é escassa ou muito desatualizada, foi discutida na 5ª Conferência Extraordinária da Organização Hidrográfica Internacional (OHI), ocorrida em outubro de 2014. Uma das soluções apresentadas foi a utilização de metodologias de derivação de batimetria a partir de imagens de satélite (SDB). Serviços hidrográficos de renome como a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), o *United Kingdom Hydrographic Office* (UKHO) ou o *Service Hydrographique et Océanographique de la Marine* (SHOM), têm vindo a apresentar resultados de estudos focados na SDB como nova fonte de informação hidrográfica. Neste contexto, o Instituto Hidrográfico (IH) é parceiro no projeto Horizon 2020 financiado pela Comissão Europeia, *Coastal Waters Research Synergy Framework* (Co-ReSyf), em que um dos objetivos será obter modelos batimétricos SDB. No âmbito comercial, existem empresas da área da deteção remota e da hidrografia, ou até parcerias entre ambas, que já disponibilizam produtos de derivação de batimetria por satélite.

Embora a utilização da SDB como fonte de informação para integração em cadeias de produção de cartografia náutica ou hidrográfica não seja consensual, dada a sua imaturidade, não se pode negar o potencial desta metodologia no apoio à decisão para a realização de LH tradicionais, na monitorização de alterações em zonas costeiras pouco profundas e canais de navegação ou na alimentação de modelos de correntes de deriva litoral.

2. METODOLOGIA

As metodologias SDB, com base em imagens multiespectrais, baseiam-se no princípio de que a luz solar, que penetra na água, é capaz de percorrer a coluna de água até ao fundo marinho e voltar à superfície por reflexão, sofrendo, contudo, atenuação ao longo do trajeto, que é variável em função do comprimento de onda da radiação solar e das propriedades físicas da água. Este princípio é aplicável à radiação de comprimento de onda entre os 350 nm (ultravioleta) e 700 nm (vermelho). Para comprimentos de onda superiores a 550 nm (verde) é pouca a radiação solar que consegue penetrar a dezena de metros de profundidade (Mobley, 1994).

2.1. Imagens utilizadas

Existe, atualmente, no IH conhecimento adquirido na aplicação de uma metodologia SDB que utiliza imagens do satélite Landsat 8 (LS8) (Guerreiro e Moura, 2015). O presente estudo pretende adaptar essa metodologia a imagens de satélite com melhor resolução espacial. Para tal recorreu-se às imagens dos satélites Sentinel 2A (S2A) e Kompsat-3 (K3), o que obrigou à revisão do processamento utilizado por Guerreiro e Moura (2015).

As imagens foram escolhidas de modo a incluir a área de teste selecionada – Ria Formosa (Barras de Faro – Olhão e Armona). Utilizaram-se imagens com cobertura de nuvens mínima e espaço temporal entre datas de aquisição o mais curto possível (Tabela I). Visto que o objetivo é comparar a performance da metodologia aplicada a pares de imagens LS8 – S2A e LS8 – K3, escolheram-se as bandas com melhor resolução espacial e resolução espectral semelhante (Tabela II).

Tabela I. Imagens utilizadas no estudo.

Imagem (Nível processamento)	Data e Hora de aquisição (UTC)	Cobertura Nuvéns
LS8 (L1T)	2013/11/20 - 11h10m21s	0,62 %
K3 (L1G)	2013/11/20 - 13h52m27s	0,0 %
LS8 (L1T)	2015/11/26 - 11h08m53s	0,4 %
S2A (L1C)	2015/11/29 - 11h21m40s	0,4 %

Tabela II. Características técnicas das imagens utilizadas no estudo. No caso das imagens S2A a resolução espectral é apresentada como "centro da banda (largura da banda)".

Satélite (sensor)	**Bandas**	**Resolução Espectral (nm)**	**Resolução Espacial (m)**
LS8 (OLI)	2 - Blue	450 - 510	30
	3 - Green	530 - 590	
	4 - Red	640 - 670	
	5 - NIR	850 - 880	
S2A (MSI)	2 - Blue	490 (65)	10
	3 - Green	560 (35)	
	4 - Red	665 (30)	
	8 - NIR	842 (115)	
K3A (AEISS)	1 - Blue	450 - 520	2,8
	2 - Green	520 – 600	
	3 - Red	630 – 690	
	4 - NIR	760 – 900	

2.2. Top Of Atmosphere Reflectance

Não tendo sido possível aplicar o mesmo algoritmo de correção atmosférica às imagens dos diferentes sensores, houve necessidade de adaptar a metodologia de processamento desenvolvida por Guerreiro e Moura (2015). Assim, optou-se pela utilização da *Top of Atmosphere Reflectance* (TOA), considerando que esta funciona como medida padrão para a comparação de imagens de diferentes sensores e/ou de diferentes datas (Green *et al.*, 2000).

2.3. Filtro passa-baixo

A aplicação de um filtro passa-baixo 3X3 melhora o resultado final dos modelos batimétricos SDB, em particular dos que resultam de imagens adquiridas em situações onde ocorra agitação marítima. Espera-se que o ruído seja superior em imagens de maior resolução espacial, o que justifica a sua utilização.

2.4. Separação terra / água

Na metodologia original, a separação terra / água baseava-se na aplicação do *Modified Normalized Diference Water Index* (MNDWI) cujo cálculo necessita de uma banda no comprimento de onda do *Middle Infrared* (MIR). No entanto, a resolução espacial da banda MIR nas imagens S2A é de 20 m. Já para imagens K3 essa banda não está disponível. Optou-se, então, por aplicar o *Normalized Diference Water Index* (NDWI) em detrimento do MNDWI, pois para o seu cálculo é utilizada a banda *Near Infrared* (NIR) que está disponível na melhor resolução espacial para todos os satélites em causa, conforme apresentado na Tabela II, recorrendo à seguinte fórmula:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

2.5. *Correção do brilho solar*

Para corrigir o efeito do brilho solar na superfície do mar foi utilizado um método, baseado em regressões lineares, entre a banda NIR e as bandas do visível (Hedley *et al*. 2005). A sua aplicação utiliza uma área de amostra em águas profundas, que inclua pixéis onde os efeitos do brilho solar sejam visíveis. A correção é, assim, dada pela fórmula que se segue:

$$R'_i = R_i - b_i\left(R_{NIR} - Min_{NIR}\right)$$

O pixel original numa banda do visível, R_i, é corrigido da diferença entre o pixel correspondente na banda NIR, R_{NIR}, e o valor mínimo na banda NIR, Min_{NIR}, à qual é aplicado um ganho, b_i, correspondente ao declive da reta de regressão linear, obtendo-se assim o pixel corrigido R'_i.

2.6. Algoritmo de derivação de batimetria

Para a derivação de batimetria (Z) a partir das imagens multiespectrais dos satélites LS8, S2A e K3, aplicou-se o algoritmo desenvolvido por Stumpf *et al.* (2003), que se baseia no rácio dos logaritmos naturais das reflectâncias de duas bandas espectrais:

$$Z = m_1 \frac{\ln\left(nR_w\left(\lambda_i\right)\right)}{\ln\left(nR_w\left(\lambda_j\right)\right)} - m_0$$

Com o aumento da profundidade o rácio diminui, dado que o logaritmo natural da banda com maior absorção, $\ln(nR_w(\lambda_j))$, diminui proporcionalmente mais rápido que o da banda de menor absorção, $\ln(nR_w(\lambda_i))$. O fator n é uma constante aplicada para que os logaritmos naturais sejam sempre positivos, de forma que o rácio produza uma resposta linear com a profundidade. O fator de ganho, m_1, e o *offset*, m_0, são os valores de calibração da imagem, determinados pela reta de regressão linear entre o rácio dos logaritmos e a profundidade de referência:

$$y = m_1 x + m_0$$

Neste trabalho, R_w (λ_i) correspondeu à banda do azul e R_w (λ_j) à banda do verde. Na regressão linear utilizaram-se profundidades retiradas de um LH com sistema sondador multifeixe (MBES), realizado em novembro de 2011, na barra de Faro – Olhão.

3. CASO DE ESTUDO – RIA FORMOSA

Para avaliar os resultados, foi utilizado um modelo batimétrico com resolução de 0,5 m, gerado por um LH com MBES, realizado em novembro de 2014, na barra de Faro – Olhão.

3.1. Comparação do par de imagens K3A / LS8

Da aplicação da metodologia às imagens K3 e LS8, de 20 de novembro de 2013, resultaram os modelos batimétricos SDB da Figura 1:

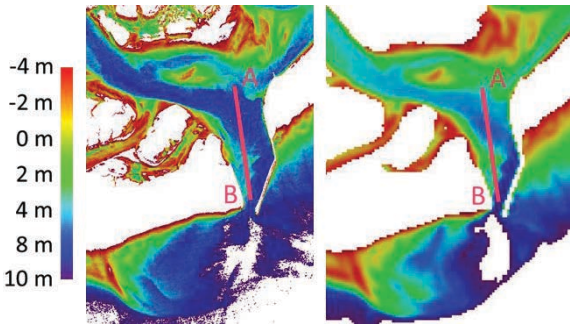


Fig. 1. Modelos batimétricos SDB derivados das imagens K3 (esquerda) e LS8 (direita), de 20 de novembro de 2013. A linha cor-de-rosa representa o traçado do perfil vertical representado na Figura 2.

Na Figura 1 é notória a vantagem do modelo batimétrico SDB K3 face ao LS8, na definição de estruturas do fundo, devido à diferença de resoluções espaciais das imagens (2,8 m *versus* 30 m, respetivamente).

O perfil traçado a cor-de-rosa na Figura 1, permitiu a comparação entre os modelos batimétricos SDB (K3 e LS8) e MBES. Desta forma, conclui-se que os primeiros apresentam resultados semelhantes, conseguindo atingir profundidades da ordem dos 10 m. Para além desse valor de profundidade, os modelos batimétricos SDB não acompanham o modelo batimétrico MBES, conforme se observa na Figura 2. Este resultado era esperado, considerando estudos já realizados (Guerreiro e Moura, 2015).

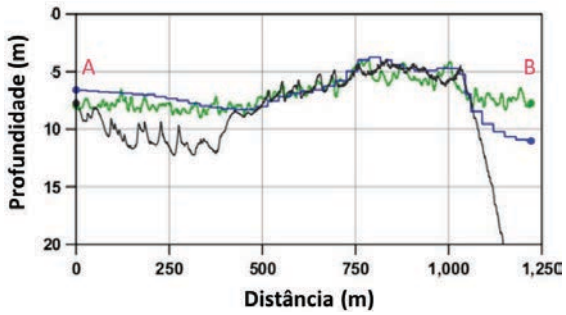


Fig. 2. Perfil vertical dos modelos batimétricos SDB K3 (verde), SDB LS8 (azul) e MBES (preto).

A média e desvio padrão das diferenças dos modelos batimétricos SDB K3 – MBES é de -1,0 m e 3,0 m, e dos modelos batimétricos SDB LS8 – MBES é de -1,0 m e 2,6 m, respetivamente.

As diferenças entre os modelos batimétricos SDB e MBES são apresentadas na Figura 3:

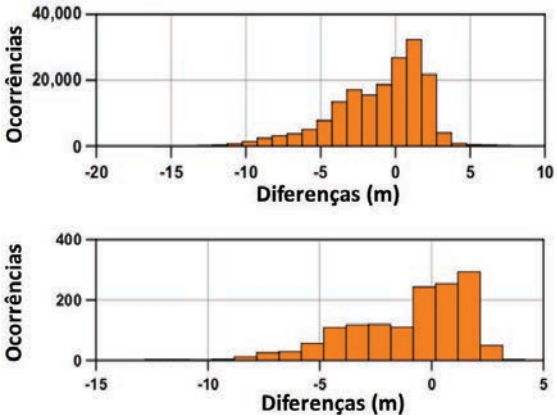


Fig. 3. Diferenças entre os modelos batimétricos SDB K3 – MBES (em cima) e SDB LS8 – MBES (em baixo).

Na Figura 4 podemos observar o detalhe do modelo batimétrico SDB K3, na zona da barra da Armona, onde é possível identificar estruturas no fundo como dunas submersas.

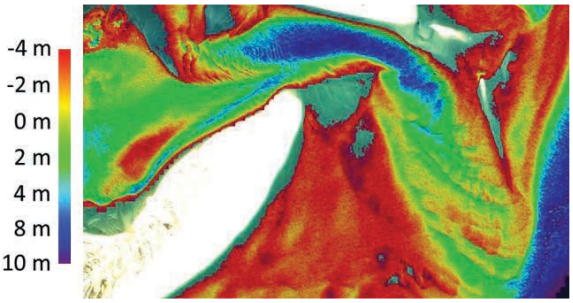


Fig. 4. Pormenor do modelo batimétrico SDB K3 na barra da Armona.

3.2. Comparação do par de imagens S2A / LS8

Da aplicação da metodologia às imagens S2A e LS8, de 29 e 26 de novembro de 2015, resultaram os modelos batimétricos SDB da Figura 5:

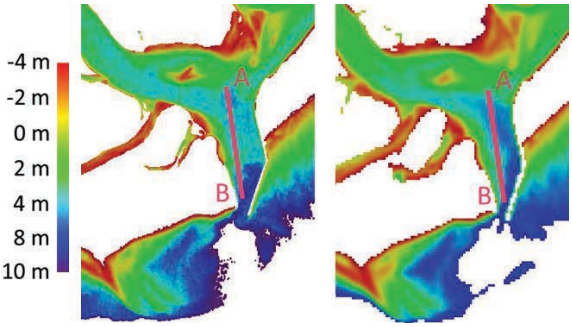


Fig. 5. Modelos batimétricos SDB derivados das imagens S2A (esquerda) e LS8 (direita), de 29 e 26 de novembro de 2015. A linha cor-de-rosa representa o traçado do perfil vertical representado na Figura 6.

O perfil traçado a cor-de-rosa na Figura 5 demonstra, mais uma vez, que os modelos batimétricos SDB (S2A e LS8) não conseguem acompanhar o modelo batimétrico MBES, para além dos 10 metros de profundidade (Figura 6). O modelo batimétrico SDB S2A parece não acompanhar a evolução do declive do fundo (ao contrário do modelo LS8) no início do perfil.

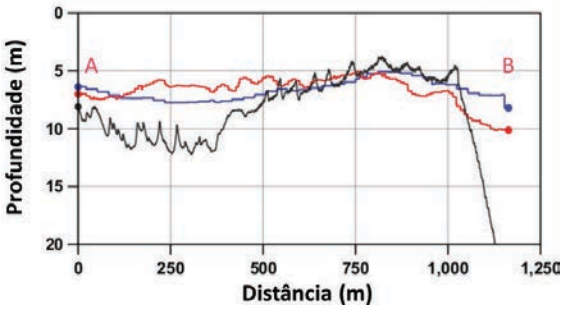


Fig. 6. Perfil vertical dos modelos batimétricos SDB S2A (vermelho), SDB LS8 (azul) e MBES (preto).

As diferenças entre os modelos batimétricos SDB e MBES são apresentadas na Figura 7:

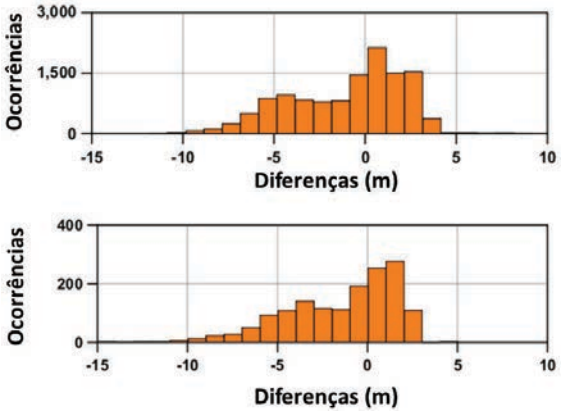


Fig. 7. Diferenças entre os modelos batimétricos SDB S2A – MBES (em cima) e SDB LS8 – MBES (em abaixo).

A média e desvio padrão das diferenças dos modelos batimétricos SDB S2A – MBES é de -1,0 m e 3,1 m, e dos modelos batimétricos SDB LS8 – MBES é de -1,4 m e 3,1 m, respetivamente.

Em geral o comportamento dos modelos é semelhante, existindo ligeira vantagem na definição das estruturas do fundo no modelo batimétrico SDB S2A, dada a sua resolução espacial ser superior à do modelo batimétrico SDB LS8 (10 m *versus* 30 m, respetivamente), conforme se observa na Figura 5.

4. CONCLUSÕES

Para a área em estudo, os modelos batimétricos SDB revelaram-se capazes de acompanhar a evolução e as principais estruturas do fundo até profundidades inferiores a 10 m, independentemente da resolução das imagens utilizadas para a sua derivação. Para além desse valor, a metodologia aplicada não obteve resultados válidos.

Considerando em particular os modelos batimétricos SDB obtidos a partir de imagens de melhor resolução espacial, K3 e S2A, quando comparados com modelos obtidos através de imagens LS8, pode concluir-se que a grande mais-valia dos primeiros é a melhor definição das estruturas do fundo. Esse resultado é devido à resolução espacial superior das imagens utilizadas para a sua construção, como se pode observar em particular no modelo batimétrico SDB obtido a partir de imagens K3.

Com o lançamento do satélite Sentinel 2B (S2B), que deverá ocorrer ainda em 2016, o ciclo de revisita do sistema de satélites Sentinel 2 passará dos atuais 10 dias para 5 dias. Estando comprovada a sua aplicabilidade à metodologia apresentada, a disponibilização dessas imagens irá constituir uma fonte de dados sem precedentes, o que potenciará a utilização de modelos batimétricos SDB no acompanhamento de processos hidromorfodinâmica, na alimentação de modelos de correntes de deriva litoral e no apoio ao planeamento de LH tradicionais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à *SI Imaging Services* pela disponibilização das imagens Kompsat-3 © KARI, à *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e *United States Geological Survey* (USGS) pela disponibilização das imagens Landsat 8 e à *European Spacial Agency* (ESA) e União Europeia (EU) pela disponibilização das imagens Sentinel 2A no âmbito do programa Copernicus. Sem elas este estudo não teria sido possível.

REFERÊNCIAS

Guerreiro, R., e Moura A. (2015) Aplicação de uma Metodologia de Derivação de Batimetria a partir de Imagens de Satélite. *VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*, Lisboa, 29-30 outubro.

Hedley, J.D., Harborne, A.R., and Mumby, P.J. (2005). Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, No. 10, 2107 – 2112.

Mobley, C.D. (1994). *Light and Water – Radiative transfer in Natural Waters*. Academic Press. 592 pp.

Stumpf, R.P., Holdereid, M., and Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, Vol. 48, No. 1, Part 2, 547-55.

Utilização de técnicas de deteção remota na definição de áreas de navegação segura: caso da Ria Formosa

C. Sousa (1), A. Almeida (1)

(1) Instituto Hidrográfico-EHO, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa; claudio.sousa@hidrografico.pt.

Resumo: Atualmente, as imagens de satélite permitem deduzir a batimetria em áreas de acesso difícil para os levantamentos hidrográficos tradicionais, com uma frequência de atualização quinzenal. A Ria Formosa é um ecossistema de grande extensão e importância ambiental e sócio-económica. Um mapa batimétrico desta área, mesmo sem os requisitos das cartas náuticas, será de grande valor para o planeamento de estudos, modelos ambientais e para a navegação de pequenas embarcações de recreio. Neste trabalho será apresentada a metodologia adotada para a dedução de um mapa batimétrico a partir de imagens Landsat 7 ETM+ (*Enhanced Temmatic Mapper Plus*), com a sua aplicação ao sistema da Ria Formosa.

Palavras-chave: batimetria, deteção remota, imagens de satélite, navegação, Ria Formosa.

1. INTRODUÇÃO

A hidrografia revela-se de extrema importância para a navegação em qualquer sistema aquático, além de ser necessária para estudos ambientais, modelação e acompanhamento de processos de erosão ou sedimentação. Os levantamentos hidrográficos tradicionais (utilizando sistemas de sondagem e técnicas *GNSS – Global Navigation Satellite System*) são lentos e de custo elevado, necessitam de embarcações, meios logísticos e pessoal especializado. Uma alternativa para a obtenção de batimetria em zonas pouco profundas é a extração dessa informação a partir de imagens obtidas por deteção remota. Esse procedimento tem mostrado ser eficaz, especialmente quando se utilizam imagens de satélites multiespectrais (Krug *et al*, 2005). De acordo com uma pesquisa realizada às séries cartográficas nacionais publicadas pelo Instituto Hidrográfico, verifica-se que uma enorme extensão dos maiores rios portugueses não tem cobertura cartográfica, por serem áreas sem utilidade para a navegação comercial clássica (Figura 1).

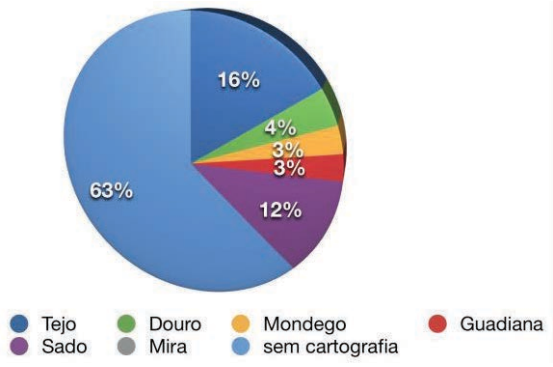


Fig. 1. Percentagem de cobertura cartográfica oficial disponível, para cada rio, em função da sua extensão. O Rio Mira não possui cobertura, e 63% do total dos 6 rios não tem levantamentos hidrográficos.

O método aqui apresentado permite a criação de produtos de qualidade adequada a outras atividades, particularmente as desportivas, turísticas, de observação da natureza, pesca, vigilância ambiental, desportos radicais, planeamento de municípios, entre outras (Figura 2).



Fig. 2. Observação de aves na Ria Formosa. Fonte: Birdwatching-Algarve, 2016.

A deteção remota permite obter mapas batimétricos atualizados, embora sem os requisitos de uma carta náutica, mas cuja qualidade é suficiente para um conjunto de aplicações novas ou até desconhecidas - que os altos custos dos levantamentos hidrográficos tornariam inexequíveis - catapultando novos negócios e investimentos regionais. Pode, por exemplo, observar-se em outros países, o potencial de atividades recreativas na natureza, particularmente no que diz respeito aos planos marinhos/fluviais, que se devem reger por um grau de segurança aceitável, tendo em conta os riscos dessas mesmas atividades. Claro que a relação custo do levantamento/risco admissível, é sempre uma questão a ter em conta, e por isso acredita-se que este método consegue alcançar esses dois

parâmetros: custos baixos e aceitáveis, permitindo que tais atividades tenham a confiança necessária ao seu desenvolvimento. O uso de dados de imagens Landsat na elaboração de mapas batimétricos pode apresentar algumas vantagens; estas fornecem uma cobertura bidimensional contínua melhor que as séries de pontos de profundidade que geralmente são obtidas por medições feitas a bordo de embarcações (Krug *et al*, 2005). A repetição da cobertura pode ser feita a cada 16 dias permitindo a atualização de profundidades em regiões fluviais ou de sapais, as quais podem mudar por processos de erosão e sedimentação ao longo do tempo ou depois de tempestades contínuas. Estas imagens oferecem informações a respeito do tipo de fundo (para regiões rasas), dos constituintes da água e da profundidade da massa de água, após a eliminação dos efeitos atmosféricos e de marés.

2. CASO DE ESTUDO

A Ria Formosa é um sapal situado no distrito de Faro - Portugal, estendendo-se ao longo de vários concelhos e abrangendo uma área de cerca de 18400 hectares ao longo de 60km. Uma parte do sistema lagunar encontra-se permanentemente submerso, enquanto que uma percentagem significativa emerge durante a baixa-mar. Apesar das variações, a profundidade média da laguna é de 2m. A sua fisionomia é bastante diversificada devido aos canais formados sob a influência das correntes de maré, formando assim, uma rede hidrográfica densa (ICNF, 2016). Atualmente, a constante presença de embarcações nos canais deve-se a vários motivos, sendo o principal, o turismo. Por ser uma zona húmida de importância internacional, como habitat de aves aquáticas, a possibilidade da sua observação atrai bastantes turistas todo o ano, que viajam em embarcações de pequena dimensão por grande parte dos canais. A Ria Formosa (Figura 3) tem a sua largura máxima junto à cidade de Faro (cerca de 6Km), e é precisamente esta a área-alvo deste estudo.

3. METODOLOGIA

3.1 Conceitos da extração de batimetria através de deteção remota

A maior parte dos métodos encontrados na literatura para a extração de batimetria, trabalha com valores de radiação recebidos pelo sensor. Existem vários modelos matemáticos, alguns mais simples (ex: modelo linear), outros mais complexos. No primeiro caso assume-se que as propriedades óticas da água são verticalmente homogéneas, e portanto consideram-se constantes sobre a imagem obtida: a iluminação, a transmissão atmosférica, o trajeto da radiação, o estado do mar, a refletância da água, a refletância do fundo e a atenuação efetiva da água. O conceito aqui apresentado é simples (e por consequência, terá uma menor precisão) e baseia-se apenas na correlação entre um modelo batimétrico e os valores digitais correspondentes das imagens multiespectrais Landsat.

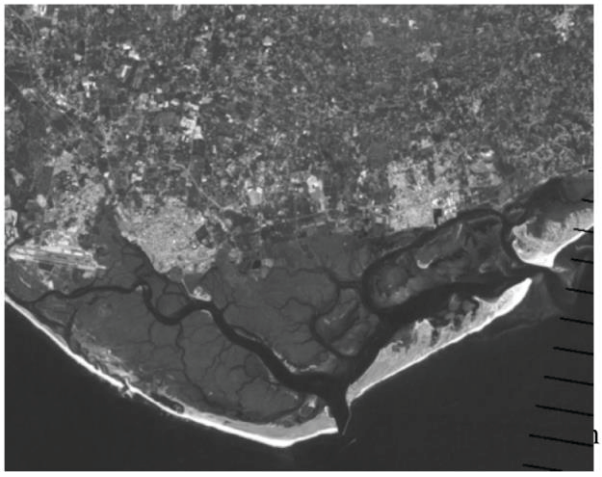


Fig. 3. Imagem Landsat 7 (banda 3) da Ria Formosa.

3.2 Espetro Eletromagnético

A água apresenta uma curva de refletância espetral característica, devido ao facto de não refletir praticamente nenhuma radiação nos comprimentos de onda do infra-vermelho e absorver totalmente a radiação eletromagnética para comprimentos de onda acima do visível. Assim, as áreas aquáticas diferenciam-se com muita facilidade da vegetação ou dos solos e são facilmente identificáveis em imagens de deteção remota. De acordo com a Agência Espacial Norte-Americana (NASA), as orientações de aplicação de cada banda Landsat são as seguintes: banda 1 (0,45-0,52 μm), apresenta grande penetração em massas de água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos; banda 4 (0,78-0,90 μm), as massas de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuras, permitindo fazer a cartografia da rede de drenagem e delineamento de áreas inundadas.

3.3 Modelo Batimétrico

Em 2011, o Instituto Hidrográfico realizou um levantamento hidrográfico por sonda multifeixe e feixe simples que cobriu grande parte da Ria Formosa e frente sul. Esses dados serviram para a conceção de um modelo batimétrico com uma resolução de 100m (disponibilizado gratuitamente para utilização em sistemas de informação geográfica) e referenciado ao sistema global WGS84. As profundidades positivas são referidas ao zero hidrográfico.

3.4 Imagens de satélite

As imagens utilizadas neste estudo foram as Landsat 7 ETM+ de 18 de Abril de 2013 (bandas 1, 3 e 4) com resolução espacial de 30m e não apresentavam cobertura de nuvens. O sistema de projecção é o UTM/zona 29. As imagens Landsat são disponibilizadas atualmente pelo Serviço de Observação Geológica Norte-Americano (United States Geological Survey - USGS).

3.5 Processamento Digital de Imagem

De modo a poder limitar as zonas aquáticas da imagem a analisar, é necessário criar uma máscara, com base nas aplicações da banda 4; desta forma as zonas inundadas tornam-se perfeitamente identificáveis, uma vez que se destacam das representadas a negro (Figura 4). A banda 3 (0,63 - 0,69um) apresentou um melhor contraste e permitiu identificar melhor as margens e zonas fundas e por isso, optou-se pela sua escolha para a continuidade do estudo, apesar das orientações da NASA para aplicação da banda 1. Segundo a USGS, a banda 3 permite obter melhores resultados em zonas costeiras, onde se observa maior turbidez da água, contrariamente às regiões oceânicas, onde a banda 1 será mais indicada.

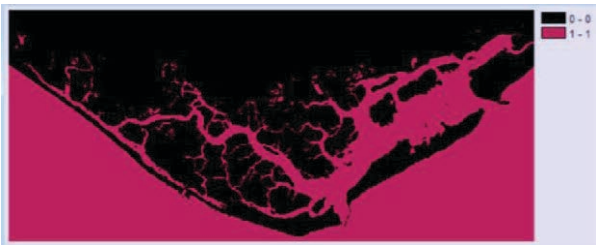


Fig. 4. Na imagem A, as áreas inundadas destacam-se do terreno, representado pela cor negra.

A utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite realizar comparações entre diferentes produtos cartográficos, análises espaciais e extração de informação. Desta forma pôde relacionar-se uma amostra de 100 pontos do modelo batimétrico com uma imagem Landsat (banda 3) da Ria Formosa, à qual foi aplicada a máscara produzida, limitando a análise apenas às áreas submersas (Figura 5). Verificou-se que, os valores dos níveis radiométricos da imagem diminuem à medida que a profundidade aumenta. Utilizando o método de regressão linear simples - com base na relação entre a amostra e os níveis radiométricos da imagem - construiu-se um modelo matemático ajustado (Figura 6) que serviu de base à elaboração de um novo mapa batimétrico. Os novos valores obtidos foram agrupados em 4 intervalos distintos de profundidade e representados com cores diferentes no mapa batimétrico (Figura 7). No processamento das imagens foi utilizado o *software* Idrisi Taiga.

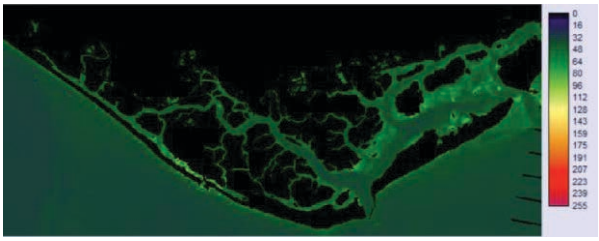


Fig. 5. A imagem da banda 3 conserva os níveis digitais originais, mas apenas para as áreas inundadas.

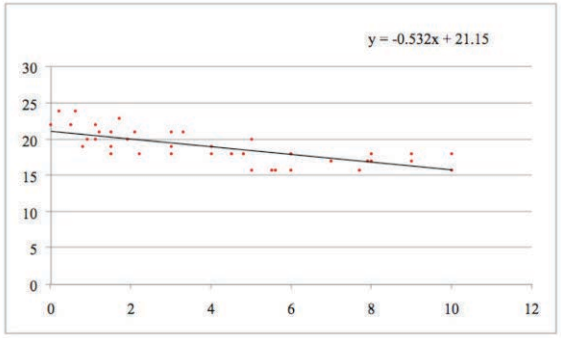


Fig. 6. Diagrama de dispersão e reta de regressão linear. No eixo vertical estão representados os níveis digitais da imagem de satélite. No horizontal, as profundidades, em metros.

A validação do mapa obtido (à custa da comparação com o modelo batimétrico) permitiu calcular um erro médio de 0,6 metros com desvio padrão de 1,7 metros. Se estes valores não cumprem os requisitos mínimos de um levantamento de ordem 2, ainda assim, permitem garantir qualidade suficiente para produtos com objetivos menos exigentes. O navegante deve utilizar a cartografia náutica com prudência e consultar as publicações de avisos aos navegantes, e por isso, os resultados deste trabalho poderão ser utilizados, tendo em conta os diferentes fins a que se destinam (ex: cartografia temática para áreas aptas à canoagem).

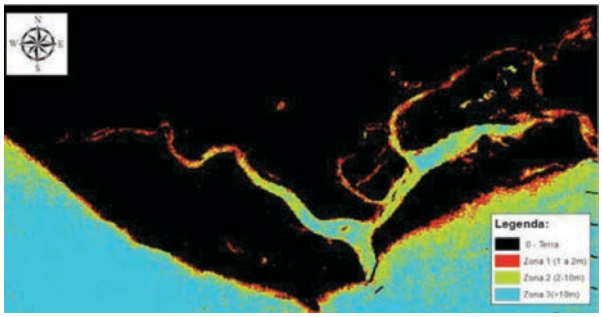


Fig. 7. Mapa batimétrico da Ria Formosa (2013). A classificação é feita de acordo com: zonas profundas (zona 3), pouco profundas (zona 2) e baixios (zona 1).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As informações obtidas em levantamentos hidrográficos com recurso a técnicas tradicionais, possuem elevada resolução e abrangência, constituindo o método de menor incerteza para a caracterização das profundidades de um meio aquático. Para projetos de grande dimensão e de ampla importância regional, como a construção de pontes ou observação de dragagens, são necessárias informações precisas para um bom planeamento e controlo de obras. Nesse caso, a obtenção de dados de profundidade deverá ser realizada com métodos mais rigorosos, e não baseada em imagens de satélite.

As técnicas de deteção remota, quando utilizadas para análise batimétrica, devem ser aplicadas com precaução, pois ainda necessitam de mais testes de confiabilidade; deverá ser feita uma análise dos erros

e perceber quais as melhores bandas e melhor metodologia a aplicar para extração de batimetria. No entanto, este trabalho demonstra que, informações obtidas a partir do sensor Landsat 7 permitem produzir mapas de profundidade do sistema aquático, constituindo uma ferramenta de baixo custo para fins variados. Adicionalmente, e no caso da área geográfica deste estudo, a obtenção periódica de imagens pode fornecer informações importantes sobre a dinâmica de sedimentação ao longo do sapal, permitindo assim "desenhar" cenários a respeito do seu comportamento futuro. A técnica utilizada pode também auxiliar em estudos de interesse geológico, tal como a evolução de sistemas fluviais. No futuro, com novas tecnologias e metodologias, espera-se obter dados para a elaboração de produtos com menor incerteza e maior e confiabilidade.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Fonseca, A., Fernandes, J. (2004). Detecção Remota. Lidel, Lisboa.

Homepage oficial de Engesat, website: www.engesat.com.br. Acesso em 21/06/2013.

Krug, L., Noernberg, M. (2005). Extração de batimetria por sensoriamento remoto de áreas rasas dos sistemas estuarinos do Estado do Paraná - Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE, Goiânia.

Lillesand, T., Kiefer, R. (1994). Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, New York.

Homepage oficial do Instituto da conservação da Natureza e Florestas, *website*: www.icnf.pt. Acesso em 21/05/2016.

Homepage oficial de Birdwatching Algarve, website: www.birdwatching-algarve.com. Acesso em 21/05/2016.

Homepage oficial do U.S. Geological Survey, website: www.usgs.gov. Acesso em 21/05/2016.

Homepage oficial da Agência Espacial Norte-Americana, website: www.nasa.gov. Acesso em 21/05/2016.

Produtos especiais de apoio às operações navais - AML

I. Fortes (1), A. José (1), H. Julião (1), R. Almeida (1) e L. Manteigas (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49-1249-093 Lisboa, isabel.fortes@hidrografico.pt

Resumo: A Divisão de Hidrografia, reconhecendo as potencialidades da Carta Electrónica de Navegação (CEN) e do modelo de dados S-57, tem produzido vários níveis de informação cartográfica para apoio a situações de catástrofe, situações de emergência e exercícios militares realizados no âmbito de operações navais. No âmbito militar, estes produtos designados por *Additional Military Layers* (AML), que não se destinam à condução da navegação, têm como objetivo o fornecimento de informação adicional para apoiar operações militares e operações no âmbito da proteção civil.
No decorrer de 2015, foram produzidos produtos essenciais para o apoio a diversos exercícios internacionais realizados pela Marinha de Guerra Portuguesa. Para além disso, têm tido uma importância crescente nos exercícios realizados pela Brigada Hidrográfica de Intervenção Rápida (BHIR), como suporte no apoio a situações de emergência envolvendo a sociedade civil. Apresentamos, neste artigo, alguns destes produtos e a sua importância nos diferentes contextos.

Palavras-chave: AML, WECDIS, S57, operações militares, produtos especiais.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento do meio marinho é indispensável no apoio às operações navais. Para isso é necessário obter em tempo útil a melhor informação disponível relativa a várias disciplinas, tais como a geologia, a topografia, a meteorologia, a hidrografia, a oceanografia bem como outras informações sobre a navegação na área em que se realizam essas operações.

Inicialmente, este apoio recorria à utilização de informação geospacial representada em cartas de papel elaboradas especialmente para esse objetivo. No entanto, esta informação encontrava-se por vezes duplicada e era produzida por diferentes entidades. Para além do trabalho e informação redundante que esta situação originava, existia sempre o perigo de inconsistências, mal entendidos e erros quando uma camada de informação concebida para determinado objectivo era utilizada para outros fins. Surgiu, então a necessidade de uniformizar e reduzir a quantidade de informação redundante existente, por forma a tornar a informação actualizada e disponível de uma forma célere e que permitisse uma melhor avaliação no terreno como suporte de apoio à decisão por parte dos diferentes utilizadores.

1.1. Evolução histórica

Assim, em 1995, surgiu o conceito de AML, uma iniciativa da NATO *(North Atlantic Treaty Organization*), desenvolvida e coordenada pelo UKHO (*United kingdom Hydrographic Office*). Os AML permitem fornecer um conjunto de dados geospaciais integrados para serem utilizados de uma forma modular e serem visualizados como camadas adicionais sobre uma carta electrónica de navegação. Este produto não se destina à condução da navegação tendo como objetivo o fornecimento de informação adicional para operações militares e operações de apoio no âmbito da proteção civil. Estas camadas adicionais que corresponderão a informação relevante para diversas missões (posição de minas, Q-routes, corredores para trânsito de submarinos, áreas de exercícios classificadas e não classificadas, zonas de exclusão, etc.) estão divididas em temas com bibliotecas e especificações próprias com a classificação dos diferentes objectos e atributos inerentes a cada um desses temas. Os requisitos aplicáveis a estes produtos estão definidos no STANAG (*Standardization Agreement*) 7170 e nas publicações da NATO AML *product specifications.*

Em 2002, foi lançada a simbologia básica dos AML, sendo o S-57 (IHO *S57-Transfer Standard for Digital Hydrographic Data*) usado nos produtos vectoriais.

2. AML

Actualmente, podem existir os seguintes tipos de produtos vectoriais que permitem fornecer informação adicional:

CLB – *Contour Line Bathymetry* - sobre profundidades.

ESB – *Environment Seabed and Beach* – sobre a natureza do fundo, espessura e natureza dos sedimentos para utilização em operações anfíbias e guerras de minas.

LBO – *Large Bottom Objects* – sobre todas as obstruções conhecidas cujas dimensões comprimento, largura ou altura sejam superiores a 5 m, tais como navios naufragados e obstruções, por forma a tornar possivel a sua utilização em operações com submarinos.

MFF – *Marine Foundation and Facilities* – sobre linha de costa, limites terrestres e marítimos, ajudas à navegação mais importantes e informação táctica de natureza diversa.

RAL – *Routes, Areas and Limits* - sobre áreas de exercícios, corredores de tráfego, áreas patrulha e informação aeronáutica seleccionada com o objectivo de conduzir operações marítimas ou alternativamente efectuar gestão de áreas marítimas.

SBO – *Small Bottom Objects* – sobre todas as obstruções conhecidas cujas dimensões comprimento, largura e altura sejam inferiores a 5 m com possível utilização em guerra de minas.

Para além dos produtos vectorias, existem, também os seguintes níveis de informação com formato matricial que permitem obter informação adicional:

IWC – *Integrated Water Column* – com as características físicas da coluna de água, tais como temperatura, salinidade, condutividade e velocidade de propagação do som, bem como das correntes oceânicas e climatologia.

AMC – *Atmospheric and Meteorological Climatology* – sobre intensidade e direcção do vento, temperatura do ar e pressão atmosférica, por forma a reflectir as variações meteorológicas.

NMB – *Network Model Bathymetry* – modelo tridimensional do fundo com mais funcionalidades do que as simples isobatimétricas.

Como consequência da produção dos AML, a NATO iniciou em 1997, o desenvolvimento dos requisitos para um WECDIS (*Warship Electronic Chart Display and Information System*), tendo resultado na criação do STANAG 4564. Este equipamento permite a integração da informação oriunda de diversos sensores, sistemas de armamento e produtos de navegação, como as cartas electrónicas de navegação, permitindo em simultâneo, o planeamento, o controlo, a navegação e a tomada de decisões atempadamente em qualquer teatro de operações. Os WECDIs deverão cumprir os requisitos aplicáveis aos ECDIS (*Electronic Chart Display and Information System*), tais como os definidos pela IMO (*International Maritime Organization*) e pela IEC (*International Electrotechnical Commission*), incluindo outros requisitos adicionais de natureza militar. Esses requisitos traduzem-se na capacidade de ler e apresentar AML, que correspondem a informação importante para missões militares.

3. AML no IH

A Divisão de Hidrografia, reconhecendo as vantagens que os AML podem oferecer em determinadas situações, tem acompanhado o seu desenvolvimento, produzindo e testando alguns destes níveis de informação.

No decorrer de 2015, foram produzidos alguns destes produtos especiais para o apoio a diversos exercícios nacionais e internacionais realizados pela Marinha de Guerra Portuguesa. Para além disso, também foram produzidos e utilizados nos exercícios realizados pela Brigada Hidrográfica de Intervenção Rápida (BHIR), como suporte no apoio a situações de emergência envolvendo a sociedade civil.

A metodología de produção e controlo de qualidade utilizada para a realização destes produtos é semelhante à utilizada na construção das CEN. No entanto, existem algumas diferenças relativas às especificações de cada um destes níveis de informação.

Um dos problemas encontrados na utilização destes produtos, reside no facto de alguns navios da Marinha não terem WECDIS e por isso a informação específica destas camadas não ser visualizada correctamente. Em alternativa e para contornar este problema, construiram-se produtos S57, que são visualizados nos ECDIS, com a informação necessária para as respectivas operações.

Nas figuras seguintes estão representados dois AML produzidos no Instituto Hidrográfico, um para apoio a um exercício militar (figura 1) e outro usado num exercício de simulação de apoio a uma situação de catástrofe realizado pela Brigada Hidrográfica de Intervenção Rápida (figura 2).

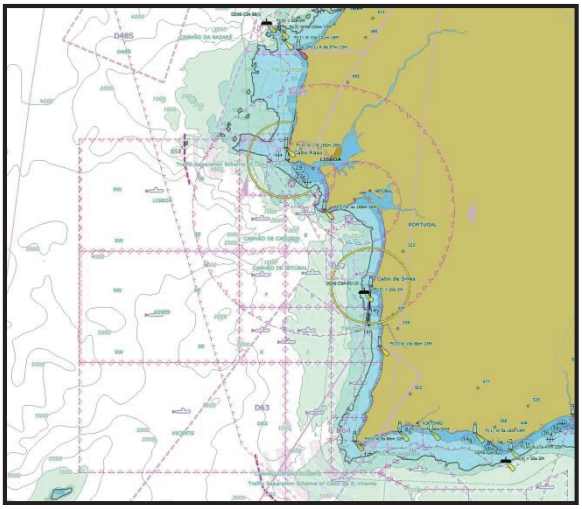


Fig. 1. AML (tipo RAL - Routes Areas and Limits) produzida para um exercício militar onde estão representadas áreas militares e informação aeronáutica.

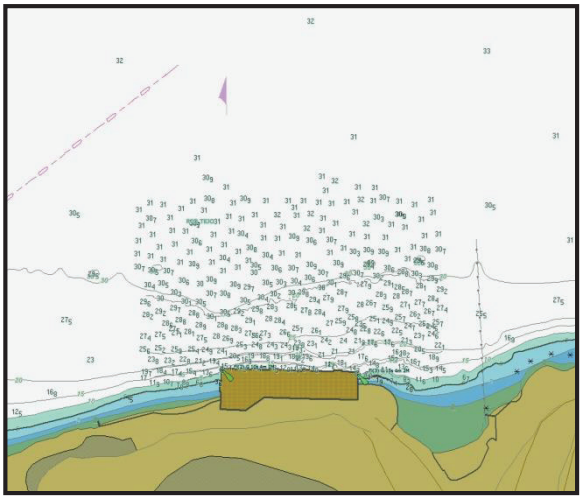


Fig. 2. AML (tipo CLB - Contour Line Bathimetry) que possui informação adicional de batimetria, sondas e áreas de profundidade.

Para o apoio ao exercício militar representado na figura 1, foi criado um AML do tipo RAL, onde foram representadas diferentes áreas essenciais para a realização deste exercício. Foram codificadas áreas militares tanto para meios navais, com navegação de superfície e de sub-superfície, como para meios aéreos. Estas áreas encontram-se definidas nas publicações NATO e nacionais em vigor, sendo facilmente visualizadas durante o planeamento e decurso das operações no WECDIS.

Na figura 2, está representado um AML do tipo CLB, que consiste num aumento da densidade de isobatimétricas e sondas representadas sobre uma CEN, facilitando as manobras de aproximação e de atracação no cais representado. Este tipo de informação é muito importante em situações de catástrofe pois permite uma avaliação rápida das eventuais alterações do fundo e um planeamento mais seguro para a condução da navegação e detecção de perigos para a navegação.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos anos, o interesse nos AML por diferentes utilizadores, tem crescido e como resultado a sua produção no IH tem aumentado. A utilização deste tipo de produtos é cada vez mais um requisito internacional pois junta vantagens inerentes a um produto digital vectorial uniformizado, aliado a informação indispensável na realização de operações militares.

Relativamente à utilização no apoio à sociedade civil oferece igualmente vantagens ao garantir o aumento da segurança da navegação em situações de catástrofe.

Os contrangimentos associados à visualização destes produtos, apenas no WECDIS, poderão ser ultrapassados com a futura implementação das normas S-100/S-101, ainda em desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

IHO (2000) IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data. Edition 3.1, November 2000, International Hydrographic Organization.

NATO (2007) STANAG 4564.

NATO (2015) STANAG 7170.

NATO (2008) AML product specification. Version 1.0, July 2005, United Kingdom Hydrographic Office.

UKHO (2012) AML Handbook. Disponível em www.ukho.gov.uk.

As potencialidades da derivação de batimetria a partir de imagens de satélite multiespetrais na produção de cartografia náutica

A. Moura (1), R. Guerreiro (1), C. Monteiro (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49 1293-049 Lisboa, ana.moura@hidrografico.pt.

Resumo: O Instituto Hidrográfico é a entidade nacional responsável pela produção da cartografia hidrográfica oficial que tem como objetivo principal contribuir para a segurança da navegação. A possibilidade de derivar batimetria a partir de imagens de satélite multiespetrais é um tópico que tem vindo a ganhar crescente dimensão no seio das comunidades hidrográficas, tendo sido inclusivamente discutida na 5ª Conferência Extraordinária da Organização Hidrográfica Internacional decorrida em outubro de 2014, no Mónaco.

Este artigo pretende avaliar as potencialidades desta ferramenta no que diz respeito à monitorização das alterações de fundo em águas pouco profundas e, consequentemente, auxiliar no planeamento e definição de áreas prioritárias para a realização de novos levantamentos hidrográficos tendo em vista uma atualização cartográfica adequada. Esta metodologia permite ainda avaliar a batimetria em áreas não sondadas ou de difícil acesso.

Para derivar a batimetria utilizaram-se metodologias e algoritmos publicados cientificamente e imagens de satélite multiespetrais distribuídas gratuitamente.

Palavras-chave: Imagens de satélite multiespetrais, derivação de batimetria, cartografia náutica.

1. INTRODUÇÃO

A possibilidade de derivar batimetria para águas pouco profundas a partir de imagens de satélite multiespetrais (metodologias SDB – *Satellite Derived Bathymetry*) é uma temática que tem vindo a ser desenvolvida no mundo académico e científico já há algumas décadas. Mais recentemente, esta possibilidade está a ser adotada nas comunidades hidrográficas pelos respetivos serviços hidrográficos com responsabilidades na produção de cartografia náutica e na segurança da navegação. É exemplo o serviço hidrográfico francês SHOM (*Service Hydrographique et Océanographique de la Marine*) com resultados já publicados. Salienta-se a discussão na 5ª Conferência Extraordinária da Organização Hidrográfica Internacional (OHI), decorrida em outubro de 2014 no Mónaco, sobre a aplicabilidade de metodologias SDB para derivar informação batimétrica a partir de imagens de satélite para áreas remotas, para as quais esta informação se torna na melhor informação existente.

Sendo o Instituto Hidrográfico (IH) a entidade nacional responsável pela produção da cartografia hidrográfica oficial, e com o intuito de acompanhar os desenvolvimentos científicos e tecnológicos e as orientações da OHI, em 2015 foram efetuados nesse instituto os primeiros testes SDB (Guerreiro e Moura, 2015). A procura de metodologias alternativas aos métodos tradicionais de aquisição de informação topo-hidrográfica, em conjunto com a disponibilização gratuita de imagens multiespetrais, algoritmos e *software*, potenciaram o interesse nas metodologias SDB para o apoio à produção de cartografia náutica. Por outro lado, o IH encontra-se numa posição privilegiada porque efetua regularmente levantamentos hidrográficos com sondadores acústicos de alta resolução e dispõe de uma vasta e atualizada base de dados batimétrica, tendo assim acesso a dados *in situ* que são fundamentais para as técnicas SDB, tanto para calibração das imagens como para validação posterior das técnicas aplicadas.

O objetivo deste artigo consiste em analisar as mais-valias da informação SBD para apoio à produção cartográfica, nomeadamente monitorizar a evolução das zonas críticas em termos de dinâmica sedimentar, identificar e quantificar as alterações das estruturas do fundo e da linha de costa, avaliar a necessidade de realização de novos levantamentos hidrográficos (LH) para a atualização cartográfica e poder ter acesso a informação SDB de áreas remotas ou com uma cobertura hidrográfica desadequada.

O estudo incidiu em duas áreas distintas: uma fora do território nacional - Porto Grande, Ilha de São Vicente - Cabo Verde, na qual o IH tem responsabilidades em termos cartográficos ao abrigo de um protocolo de cooperação, e outra área - Barra de Caminha, que apresenta grande dinâmica de fundo, com diversos baixios e que, por questões de segurança, existem diversas zonas não sondadas representadas a branco na respetiva carta náutica.

Neste estudo utilizaram-se imagens de satélite multiespetrais Landsat 8 e Sentinel-2A, e uma metodologia adaptada relativamente à apresentada por Guerreiro e Moura (2015).

2. METODOLOGIA

A capacidade da luz penetrar na coluna de água é o princípio fundamental que permite inferir batimetria a partir de imagens de satélite multiespetrais. Com base neste princípio, a luz emitida pelo sol atravessa a atmosfera, penetra na coluna de água e é refletida pelo fundo em águas pouco profundas, sendo esta radiação captada pelos sensores do satélite. A transmitância da luz através da coluna de água depende do comprimento de onda (ocorre entre os 350 nm (ultravioleta-azul) e os 700 nm (vermelho)), da profundidade e da turbidez (Mobley 1994, Pe'Eri *et al*. 2014). Para comprimentos de onda superiores aos 700 nm (infravermelho) a transmitância na água do mar é muito baixa.

O algoritmo utilizado foi o algoritmo apresentado por Stumpf *et al.* (2003). É um método otimizado que assume como invariantes a coluna de água e o fundo (atenuação da coluna de água e refletância do fundo uniformes). Baseia-se no rácio dos logaritmos naturais das refletâncias de duas bandas:

$$Z = m_1 \frac{\ln\left(nR_w\left(\lambda_i\right)\right)}{\ln\left(nR_w\left(\lambda_j\right)\right)} - m_0$$

onde *Z* é a profundidade, *m1* um ganho, *m0* um *offset*, *Rw (λi)* refletância na banda do azul, *Rw (λj)* refletância na banda do verde e *n* uma constante aplicada para que os logaritmos naturais sejam sempre positivos e o seu rácio devolva uma resposta linear com a profundidade. O *m1* e *m0* são determinados por meio de uma regressão linear entre o valor do rácio dos logaritmos e a profundidade. Com a sua determinação é possível calibrar um modelo relativo de forma a obter um modelo batimétrico.

1.1. Pré-Processamento das Imagens de Satélite

Um dos aspetos importantes no pré-processamento das imagens de satélite quando se pretende inferir batimetria é a calibração radiométrica. O algoritmo de Stumpf reduz erros associados a variações de *albedo* na atmosfera, na coluna de água e no fundo, uma vez que ambas as bandas, azul e verde, são afetadas de forma similar. Com efeito, alterações ao rácio das bandas azul-verde são mais afetadas pela profundidade do que pela refletância do fundo (Pe'eri *et al.* 2014). Neste sentido, não se efetuaram correções atmosféricas, considerando para o algoritmo valores de refletância TOA (*Top of Atmosphere*) (em vez de refletâncias à superfície do mar).

A separação terra / água foi efetuada aplicando o índice *Modified Normalized Diference Water Index* (MNDWI), para as imagens Landsat 8, cujo cálculo necessita de uma banda no comprimento de onda do *Middle Infrared* (MIR), e o índice *Normalized Diference Water Index* (NDWI), para as imagens Sentinel-2A, que utiliza a banda *Near Infrared* (NIR). Esta escolha advém do facto de nas imagens Sentinel-2A a banda correspondente ao MIR ter uma resolução espacial inferior (20 m) relativamente às bandas do visível e NIR (10 m). Tanto o MNDWI como o NDWI produzem valores positivos para água e valores negativos para terra. Definindo um *threshold* adequado, diferente de zero, verificou-se que, para além da separação terra / água, também se consegue eliminar a presença de nuvens (mas não a sua sombra), navios e rebentação.

A correção do brilho solar, quando aplicável, foi baseada no algoritmo de Hedley *et al.* (2005) e com a metodologia descrita em Guerreiro e Moura (2015). As imagens utilizadas foram escolhidas, tanto quanto possível, sem influência de brilho solar e da cobertura de nuvens.

1.2. Calibração do modelo batimétrico SDB

Para a calibração dos modelos batimétricos SDB utilizaram-se os valores de profundidade apresentados nas cartas náuticas (CN), simulando a "situação real" que antecede um LH. Uma vez que aqueles valores são referidos ao zero hidrográfico (ZH), o modelo calibrado final é obtido sem o efeito da maré, reduzido ao ZH. Como o algoritmo é aplicado a áreas pequenas, considera-se que o *offset* vertical *m0* modela bem as diferenças de maré que se podem encontrar na área de estudo (Pe'eri *et al*. 2014). Deste modo, o procedimento adotado elimina a necessidade de aplicar correções e concordâncias de maré. Assim, o nível da maré apenas vai afetar a delineação da fronteira terra-água no instante de aquisição da imagem.

3. IMAGENS SATÉLITE E *SOFTWARE*

Como referido anteriormente, um dos incentivos para este estudo foi a disponibilização gratuita de imagens de satélite multiespetrais e de *software* de processamento. Para o efeito, utilizaram-se imagens Landsat 8 (LS8) *Level* 1T retiradas do *website Earth Explorer* da USGS (*United States Geological Survey*) e imagens Sentinel-2A (S2A) *Level* 1C do programa Copernicus retiradas do *website Sentinel Data Hub* (ambas ortoretificadas e projetadas em UTM/WGS84). As primeiras com uma resolução radiométrica de 16 bits e as segundas com 12 bits.

Tabela I. Bandas multiespetrais utilizadas e respetivas resoluções espetral e espacial. Para as imagens S2A a resolução espetral é dada por "centro de banda" (largura de banda).

Satélite (sensor)	Bandas	Resolução Espetral (nm)	Resolução Espacial (m)
LS8 (OLI)	2 - Blue	450 - 510	30
	3 - Green	530 - 590	
	4 - Red	640 - 670	
	5 - NIR	850 - 880	
	6 - SWIR1	1570 - 1650	
S2A (MSI)	2 - Blue	490 (65)	10
	3 - Green	560 (35)	
	4 - Red	665 (30)	
	8 - NIR	842 (115)	

O programa utilizado para processar as imagens de satélite foi o SNAP (*Sentinel Application Platform*) disponibilizado pela Agência Espacial Europeia.

4. CASOS DE ESTUDO

4.1 Barra de Caminha

A barra de Caminha apresenta uma grande dinâmica de fundo. Na CN26409, 1ª edição, existe uma extensa área representada a branco com a indicação de área "Não sondada" (Figura 1) onde, por questões de segurança, não se efetuaram recentemente LH com sondadores acústicos. Nessas áreas, a derivação SDB permite ter uma noção do fundo marinho e das suas alterações de uma forma regular e gratuita.

Para este caso de estudo utilizaram-se imagens Landsat 8 (de agosto de 2014 e setembro de 2015) e Sentinel 2A (de abril de 2016). Para calibração utilizaram-se as sondas da CN 26409, que dizem respeito a um LH realizado com sondador acústico de feixe simples em 2011. Devido à forte agitação marítima que se faz sentir ao largo só foi possível derivar batimetria SDB até aos 5 m de profundidade.



Fig. 1. Excerto da CN26409, 1ª edição.

Na Figura 2 é apresentada uma evolução temporal da barra desde agosto de 2014 até abril de 2016.

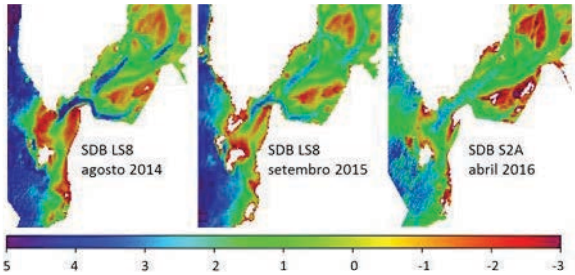


Fig. 2. Série temporal da evolução batimétrica da barra de Caminha em 2014, 2015 (Landsat 8) e 2016 (Sentinel-2ª).

Efetuando uma comparação entre os diferentes modelos batimétricos SDB verifica-se grande dinâmica das estruturas de fundo, realçando que a identificação destas estruturas é independente do sensor. Entre a Ínsua e Espanha existem sempre profundidades negativas (que cobrem e descobrem com a maré). O canal de entrada a sul, entre a Ínsua e Portugal, é "móvel" e tem tendência para "fechar" (presença de valores negativos em 2015). De uma forma geral verifica-se que os canais do Rio Minho estão bastante assoreados. Apesar da situação estar devidamente salvaguardada na CN com a nota "Zona em evolução", tendo por base os valores de profundidade determinados pelo modelo batimétrico SDB Sentinel-2A 2016 para os canais de navegação interiores e observando a tendência de evolução evidenciada pela série temporal, considera-se adequado efetuar um estudo mais pormenorizado para avaliar a situação.

4.2 São Vicente – Porto Grande, Cabo Verde

A derivação do modelo batimétrico SDB foi efetuada a partir de uma imagem Sentinel-2A de 22 de abril de 2016. Para a calibração do modelo utilizaram-se os valores de profundidade representados na CN66302, 1ª Edição, que dizem respeito a LH realizados em 2006 e 2010 a feixe simples.

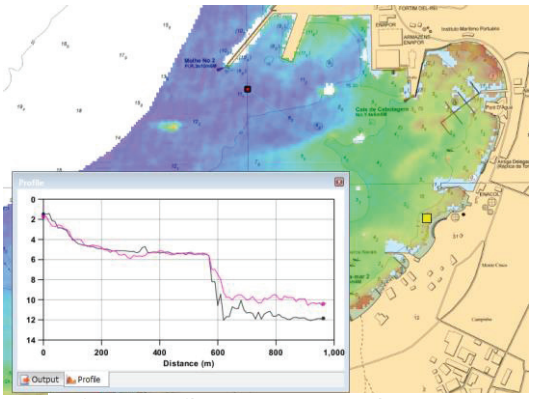


Fig. 3. Perfis de superfície do modelo batimétrico SDB Sentinel-2A (rosa) e do LH realizado em 2016 (preto).

Analisando o perfil da Figura 3 verifica-se que, por comparação com um LH realizado em fevereiro último que evidencia dragagens efetuadas no interior do porto, o modelo SDB permite detetar essas alterações na batimetria (sendo o "degrau" que ocorre sensivelmente entre os 5 m e os 10-12 m o limite da área dragada). Se não houvesse LH para comparação, as alterações detetadas seriam suficientes para despoletar mecanismos de averiguação das alterações e agir em concordância para efetuar a atualização catográfica, uma vez que as alterações encontradas implicam uma correção à informação batimétrica da CN.

4.3 Deteção de novas estruturas portuárias e perigos para a navegação

Apesar da metodologia apresentada ser de derivação de batimetria, a partir das imagens de satélite, pela aplicação dos referidos índices MNDWI e NDWI podem-se criar subprodutos fundamentais (máscaras) na identificação de novas estruturas portuárias, perigos para a navegação (nomeadamente rochas a descoberto) e alterações à linha de costa, essenciais para a cartografia náutica. Com base nestes índices, é possível separar automaticamente (independente da interpretação visual e com um *threshold* adequado – valores utilizados entre 0,25 e 0,35) os objetos que estavam a descoberto dos objetos que estavam cobertos com água no instante de aquisição da imagem, em função da maré.



Fig. 4. Deteção de alterações da estrutura portuária e linha de costa em Porto Grande (imagem da CN66302, composição RGB da imagem Sentinel-2A e máscara criada a partir do índice NDWI).

5. POTENCIALIDADES

A mais-valia das metodologias SDB, inerente a todas as técnicas de deteção remota, consiste em permitir "conhecer" a morfologia do fundo em áreas relativamente extensas sem estar em contacto direto com o meio, tendo *a priori* observações *in situ* em número reduzido.

A capacidade de monitorizar remotamente alterações de fundo significativas permite, com base numa análise cuidada e criteriosa, avaliar a adequabilidade da informação batimétrica representada numa CN e, consequentemente, priorizar LH com vista à sua atualização. Esta capacidade ganha uma dimensão acrescida em zonas de interesse cartográfico de difícil acesso, quer por questões geográficas (caso de alguns países PALOP nos quais Portugal tem responsabilidades em termos cartográficos), quer por questões de segurança.

Adicionalmente, as imagens têm um repositório temporal que possibilita a criação de um histórico para a evolução de fundo ajudando a compreender a sua tendência em termos de dinâmica sedimentar. As séries temporais permitem ainda, através da repetibilidade de ocorrência, certificar o que de facto é fundo "real" e o que é inferido como um "falso" fundo devido a condições específicas registadas na imagem à data de aquisição (nomeadamente plumas de sedimentos, *upwelling* ou agitação marítima).

Existem, no entanto, algumas limitações à metodologia apresentada. Salvaguarda-se que as condições meteo-oceanográficas no instante da aquisição, bem como a presença de sedimentos em suspensão ou clorofila na coluna de água, influenciam fortemente os resultados. É ainda necessário referir que, com esta metodologia e tendo em conta a resolução espacial das imagens utilizadas, apenas se identificam as estruturas de fundo mais significativas, não sendo possível garantir a deteção de todos os objetos de fundo relevantes e com interesse para a navegação.

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia adotada para derivar batimetria a partir de imagens de satélite em águas pouco profundas (até aos 10 m de profundidade) revela-se uma ferramenta valiosa de baixo custo, viável para integrar e apoiar a produção cartográfica, sendo útil na identificação das necessidades da sua atualização, planeamento de LH e reconhecimento topo-batimétrico local.

A informação adquirida pelas atuais metodologias SDB, é uma informação qualitativa que tem de ser utilizada de forma criteriosa e que, neste momento, não pode ser vista como substituição de informação batimétrica adquirida com recurso a sondadores acústicos, ou outras tecnologias como o LiDAR batimétrico, considerados como sensores de grande resolução.

Classificar a informação batimétrica adquirida por metodologias SDB, em condições reais, com uma determinada incerteza associada, será a ambição futura. A evolução das metodologias SDB, com o cálculo das respetivas incertezas, poderá significar no futuro uma adaptação das especificações da OHI S-44 (*IHO Standards for Hydrographic Surveys*) e S-4 (*Regulations for International (INT) Charts and Chart Specifications of the IHO*) que, na perspetiva cartográfica, significa poder incluir dados SDB numa carta náutica, informando corretamente o navegador da fiabilidade dessa informação.

Agradecimentos

Os autores agradecem à *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) *United States Geological Survey* (USGS) a disponibilização das imagens LANDSAT 8 e à *European Spacial Agency* (ESA) e União Europeia (EU) pela disponibilização das imagens Sentinel-2A no âmbito do programa Copernicus. Sem elas este estudo não teria sido possível.

REFERÊNCIAS

Guerreiro, R., e Moura A. (2015) Aplicação de uma Metodologia de Derivação de Batimetria a partir de Imagens de Satélite. *VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*, Lisboa, 29-30 outubro.

Hedley, J.D., Harborne, A.R., and Mumby, P.J. (2005). Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, No. 10, 2107 – 2112.

Mobley, C.D. (1994). *Light and Water – Radiative transfer in Natural Waters*. Academic Press. 592 pp.

Pe'Eri, S., Parrish, C., Azuike, C., Alexander, L., and Armstrong, A. (2014). Satellite Remote Sensing as a Reconnaissance Tool for Assessing Nautical Chart Adequacy and Completeness. *Marine Geodesy*, 37:3, 293-314.

Stumpf, R.P., Holdereid, M., and Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, Vol. 48, No. 1, Part 2, 547-55.

Utilização de modelos de ondulação de geoide em levantamentos hidrográficos em Cabo Verde

J. Gaspar (1), J. Vicente (1) e M. Arenga (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa; rosado.gaspar@hidrografico.pt

Resumo: Em 2004, no âmbito do acordo de cooperação entre Portugal e Cabo Verde, por solicitação da Agência Marítima e Portuária, o Instituto Hidrográfico retomou a realização de levantamentos portuários naquele arquipélago, com o objetivo de atualizar a cartografia náutica oficial. Nestes levantamentos, a referenciação das profundidades observadas ao Zero Hidrográfico tem sido feita recorrendo a dados de maré obtidos por marégrafos portáteis, instalados aquando da execução dos levantamentos. No entanto, a utilização do sistema de posicionamento *Differential Global Navigation Satellite System* em modo *Real Time Kinematic* apresenta diversas vantagens, entre as quais, minimiza a influência do comportamento dinâmico e da arfagem das embarcações de sondagem, e da variação espacial e temporal da altura de maré. Assim, o objetivo desta comunicação é analisar a adequabilidade de modelos locais e globais da ondulação do geoide, essenciais para a utilização deste sistema de posicionamento, comparando ambas as metodologias para o processamento dos dados de sondagem do levantamento realizado em 2016.

Palavras-chave: Hidrografia, cartografia, geoide, marés, DGNSS RTK, Cabo Verde.

1. INTRODUÇÃO

No âmbito do projeto de Cooperação no Domínio da Hidrografia entre Portugal e Cabo Verde, de outubro a dezembro de 2004, foi efetuado um levantamento topo-hidrográfico (LTH) neste arquipélago, contemplando os portos de Palmeira na ilha do Sal, Sal-Rei na ilha da Boavista, Praia na ilha de Santigado e Tarrafal na ilha de São Nicolau.

Posteriormente, em novembro de 2005, uma equipa do Instituto Hidrográfico (IH) deslocou-se ao arquipélago de Cabo Verde, tendo por objetivos a "definição de um fólio cartográfico adequado às necessidades de Cabo Verde, cobrindo os portos com maior interesse para a navegação, com planos de grande escala, e a identificação de necessidades em termos de levantamentos topo-hidrográficos, com base na informação recolhida e no reconhecimento efetuado" (Lopes e Arenga, 2006). No seguimento desta visita técnica foram realizados diversos LTH, nomeadamente nos anos 2006, 2007, 2009, 2010 e 2016, perfazendo, desde 2004, 170 dias de trabalho de campo, em que foram cobertos os principais portos das nove ilhas atualmente habitadas, alguns deles com mais do que um LTH no sentido de acompanhar as alterações decorrentes de obras marítimas e alimentando o processo de elaboração e atualização das cartas náuticas (CN).

Naqueles trabalhos, a redução das sondas ao *datum* vertical, zero hidrográfico (ZH), foi efetuada com recurso aos valores de maré lidos em marégrafos portáteis instalados nos locais dos levantamentos hidrográficos (LH). Onde existiam marcas de nivelamento (MN) com altitude ortométrica conhecida, realizaram-se nivelamentos geométricos (NG) para transporte de cota desde as MN até aos sensores maregráficos. Nas ilhas onde, pelo contrário, não existiam MN próximas das áreas dos LH foram efetuadas observações de maré simultâneas, no local e nas ilhas com marégrafos referenciados ao ZH possibilitando, deste modo, por correlação dos dados, uma estimação adequada da maré, tendo em consideração os requisitos dos LH.

Note-se que, em Cabo Verde o ZH é o plano de referência localizado 0.80 m abaixo do Nível Médio do mar Adotado (NMA) definido pela Missão Hidrográfica do Arquipélago de Cabo Verde em 1946 (MHACV, 1947).

Quando se utilizam observações de maré pontuais para a redução da sondagem ao *datum* altimétrico, é assumido que as observações de maré são aplicáveis a toda a área levantada com uma incerteza inferior a 10 cm (nível de confiança de 95%). Por outro lado, tradicionalmente, e dentro das incertezas admissíveis para um levantamento, é ainda assumido que:

- A imersão do transdutor é um valor constante, ou seja, que não varia com as condições do levantamento (deslocamento, alterações de velocidade, condições oceanográficas, etc.);
- No início de cada fiada de sondagem o sensor de arfagem encontra-se estabilizado na sua referência vertical e a embarcação estável em rumo e velocidade.

Uma vez que as considerações assumidas no método anteriormente descrito, em rigor, podem-se desviar da realidade em valores difíceis de quantificar, sempre que possível, é recomendável que o posicionamento da embarcação seja feito no modo *Global Navigation Satellite System* (GNSS) *Real*

Time Kinematic (RTK) (Nunes *et al*., 2013). Desta forma, consegue-se, simultaneamente, minimizar os erros devidos ao comportamento dinâmico e alteração do deslocamento (imersão do transdutor) da embarcação, a desvios da referência vertical do sensor de arfagem, assim como, a erros devidos às variações espaciais e temporais da altura de maré. A utilização do posicionamento GNSS RTK permite ainda, nas atuais aplicações de aquisição de dados hidrográficos, obter a referenciação das sondas observadas ao *datum* vertical em tempo real.

Em Portugal continental, com a implementação do modelo do geoide GeodPT08 (Catalão, 2009; DGT, 2016), a utilização das técnicas de posicionamento GNSS RTK nos levantamentos hidrográficos portuários é o estado da arte. No entanto, a aplicabilidade destas técnicas a Cabo Verde carece da implementação de um modelo local de separação entre o *datum* vertical e o elipsoide (MLS-DV-E) com uma resolução adequada ou a avaliação da adequabilidade de modelos globais.

2. METODOLOGIA UTILIZADA

2.1 Área de estudo e características do LH

Para o estudo foram utilizados os dados adquiridos por um sondador de feixe simples (SFS), no LH de ordem 1b, de acordo com as normas da Organização Hidrográfica Internacional (OHI, 2008), realizado no Porto Grande, na ilha de S. Vicente, em março de 2016. As fiadas foram realizadas perpendicularmente à orientação geral das isóbatas representadas na CN 66302, com espaçamento entre si de 12.5 m na área interior do porto, de 25 e de 50 m na área exterior, em função das profundidades existentes. Os dados de sondagem adquiridos foram corrigidos de arfagem através das leituras de uma unidade de referência vertical (URV). As observações de maré foram registadas por um marégrafo de radar instalado junto da MN MHACV4, localizada no cais comercial do Porto Grande. Paralelamente, foi garantido o posicionamento (horizontal e vertical) GNSS RTK da embarcação de sondagem, a partir de uma estação de referência instalada num local portuário apropriado. A posição da estação de referência foi obtida com recurso a observações GNSS, com 17 horas de duração, processadas na aplicação CSRS-PPP (NRC, 2016) obtendo-se uma incerteza vertical de 0.013 m (nível de confiança de 95%).

2.2 Processamento dos dados adquiridos e análise de resultados

As sondas observadas foram processadas e referenciadas ao ZH de três modos diferentes:

- Utilizando as leituras de maré;
- Utilizando o posicionamento RTK e o *Earth Gravitational Model* 2008 (EGM 2008) (NGA, 2016) ajustado;
- Utilizando o posicionamento RTK e um MLS-DV-E.

O processamento é abordado no parágrafo 3. Por fim, a partir das sondas reduzidas validadas, foram gerados modelos batimétricos (MB) com 2 m de resolução, selecionando para cada nodo a sonda mínima existente no interior de cada nodo. As comparações entre os MB e os resultados obtidos são abordados no parágrafo 4.

A Fig. 1 ilustra a área do levantamento com um MB gerado a partir do processamento dos dados de sondagem referidos ao *datum* vertical, utilizando as observações de maré.

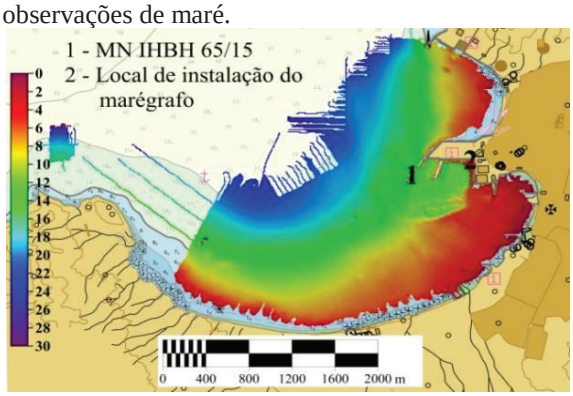


Fig. 1. Imagem do MB interpolado a partir do MB de 2 m de resolução processado com observações de maré, sobre a CN 66302 (Porto Grande, São Vicente).

3. REDUÇÃO DA SONDAGEM AO DATUM VERTICAL

Os diferentes métodos de redução da sondagem ao *datum* vertical são explanados nas secções seguintes e ilustrados na Fig. 2.

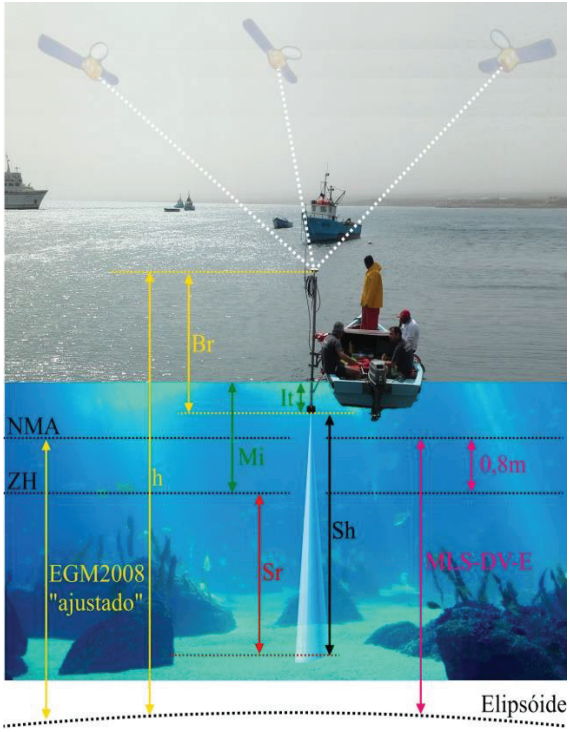


Fig. 2. Esquema das variáveis consideradas nos três processos estudados, para a redução das sondas (a identificação das variáveis é feita nas secções seguintes).

3.1 Marés

Na referenciação da sondagem ao *datum* vertical a partir de observações de maré é necessário que o marégrafo esteja referido ao NMA (consequentemente ao ZH). Conhecendo o valor médio da imersão do transdutor (*It*), o valor de cada sonda à hora (*Sh* – profundidade determinada pelo sondador e referida à face do transdutor), o valor de maré em cada instante (*Mi*) e a arfagem (*Ar*) a sonda reduzida (*Sr*) é dada pela equação 1.

$$Sr = Sh + It - Mi - Ar \quad (1)$$

3.2 EGM2008 ajustado

Para avaliar a aplicabilidade do EGM2008 foi determinada a altitude ortométrica da MN 65/15, localizada junto ao molhe N.º 2 do Cais Comercial do Porto Grande, de duas formas:

- NG a partir da MN de referência do marégrafo (MHACV4) com um erro de fecho de 1.25 mm;
- Determinação da altitude elipsoidal a partir de 3 horas de observações GNSS, com o processamento na aplicação CSRS PPP, obtendo-se uma incerteza vertical de 0.041m (nível de confiança de 95%), e posterior conversão em altitude ortométrica a partir do valor local do EGM2008.

Ao comparar as altitudes ortométricas obtidas pelos dois métodos, verificou-se que, nesta MN, foi necessário somar ao modelo 0.41 m para o ajustar ao NMA. Em virtude do tempo disponível não foi possível alargar a determinação de valores de compensação do modelo a outros pontos. A correção de 0.41 m foi aplicada ao EGM2008, designando-se, doravante EGM2008 ajustado (EGM2008Ajust).

Conhecendo-se as variáveis indicadas na secção 3.1, a altitude elipsoidal do centro de fase da antena GNSS (*h*) e a distância vertical entre o centro de fase da antena GNSS e a face do transdutor (*Br*), a separação entre o NMA e o ZH (0,8 m), a determinação das sondas reduzidas é dada pela equação 2.

$$Sr = Sh + Br - h + EGM2008Ajust - 0{,}8 \quad (2)$$

3.3 Modelo MLS-DV-E

Este modelo está implementado na aplicação CARIS HIPS *and* SIPS versão 9.1.1 (CARIS, 2016) e utiliza, num cálculo inverso, a informação das sondas reduzidas a partir da maré. Permite todas as vantagens do posicionamento GNSS RTK, considerando, como limitação à sua utilização, que as diferenças espaciais e temporais da maré em quaisquer dois pontos da área sondada são irrelevantes relativamente aos requisitos do LH.

Partindo da definição da resolução (neste caso, foi selecionado o valor de 100 m), a aplicação determina para cada nodo do modelo a média de todas as amostras (*Ai*) existentes no interior de cada célula, sendo *Ai* determinada a partir da equação 3.

$$Ai = h - Sh - Br - Ar + Sr \quad (3)$$

Determinado o modelo (Fig. 3), o cálculo das *Sr* com posicionamento RTK é equivalente ao apresentado na equação 2.

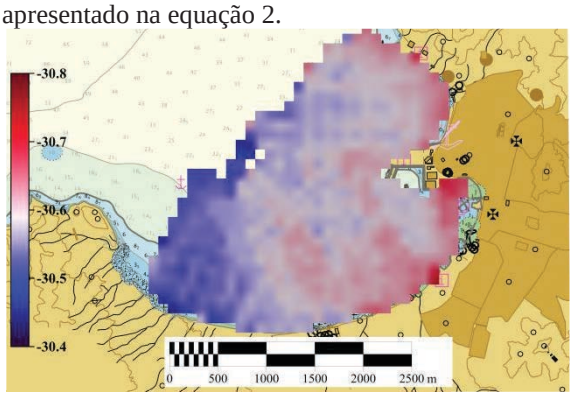


Fig. 3. Modelo MLS-DV-E com 100 m de resolução.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Foram comparados, entre si, os MB finais com 2 m de resolução, obtidos em cada um dos processos de redução da sondagem.

A Fig. 4 apresenta, sobreposta à CN, a superfície resultante de uma rede triangular irregular (TIN), elaborada apenas para efeitos de visualização, construída a partir das diferenças entre o MB gerado a partir das sondas referidas verticalmente ao ZH a partir do MLS-DV-E ($MB_{MLS\text{-}DV\text{-}E}$) e o MB gerado a partir das sondas reduzidas de maré ($MB_{maré}$).

A Fig. 5 ilustra estatisticamente a distribuição das diferenças e a conformidade entre modelos quando observada a média das diferenças.

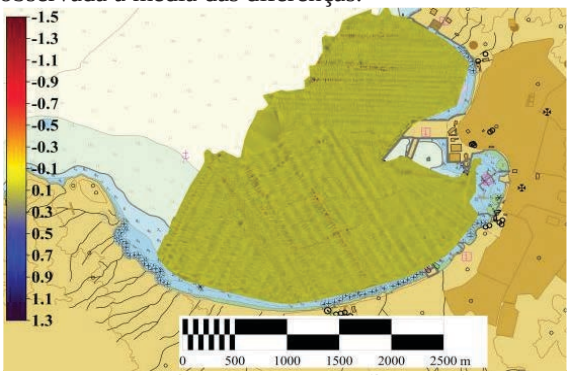


Fig. 4. TIN construído a partir da superfície de diferenças (m) entre o $MB_{MLS\text{-}DV\text{-}E}$ e o $MB_{maré}$ de 2m de resolução.

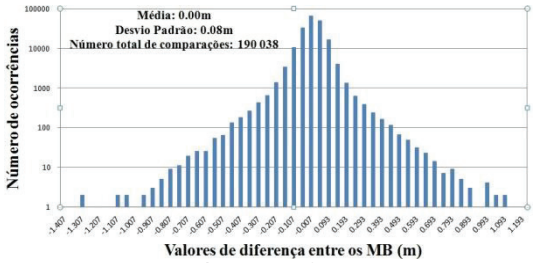


Fig. 5. Distribuição estatística das diferenças, em metros, entre o $MB_{MLS\text{-}DV\text{-}E}$ e o $MB_{maré}$, de 2 m de resolução.

No entanto, cerca de 1.5 % e de 0.2 % das diferenças apresentam, respetivamente, valores superiores a metade e a uma vez a máxima incerteza vertical admissível para levantamentos de ordem 1 (cerca de 0.52 m para uma profundidade de 10 m), situações que correspondem a:

– Degradação, perda ou multitrajeto do sinal GNSS RTK, visível no datagrama da altitude elipsoidal da antena (Fig. 6). Note-se que estas situações ocorridas no posicionamento GNSS RTK não foram processadas previamente e correspondem às diferenças mais grosseiras;



Fig. 6. Datagrama da altitude elipsoidal da antena GNSS correspondente a uma elevada diferença entre os MB (falha no posicionamento GNSS RTK).

– As diferenças de menor valor (em regra, oscilações entre valores negativos e positivos inferiores a metade da máxima incerteza vertical admissível) correspondem aos erros induzidos pela alteração da imersão do transdutor em função do comportamento dinâmico da embarcação e à assunção de um valor constante para *Br* (valor que na realidade depende do balanço e do cabeceio), realçando-se que maioritariamente, as fiadas de sondagem foram realizadas na presença de estado do mar adverso (vaga e/ou ondulação superior a 1 m, por vezes na ordem dos 2 m), razão para o incremento da incerteza de diversas medições, como por exemplo, a arfagem.

Comparando os MB gerados a partir das sondas referidas verticalmente ao ZH a partir do EGM2008Ajust ($MB_{EGM2008Ajust}$) e a partir do $MB_{MLS\text{-}DV\text{-}E}$ obtêm-se 190038 diferenças, com uma média de -0.06 m e um desvio padrão de 0.03 m. Estes resultados indicam a semelhança entre os dois modelos, podendo as diferenças dever-se a:

– A leitura da maré foi feita num único ponto, significando que a maré utilizada na redução da sondagem representa melhor a onda de maré numas zonas do que em outras;
– O ajuste feito ao modelo global EGM2008 foi quantificado tendo em consideração a diferença obtida, também num único ponto, entre a altitude elipsoidal e a cota ortométrica.

A Fig. 7 ilustra a diferença entre os dois modelos.

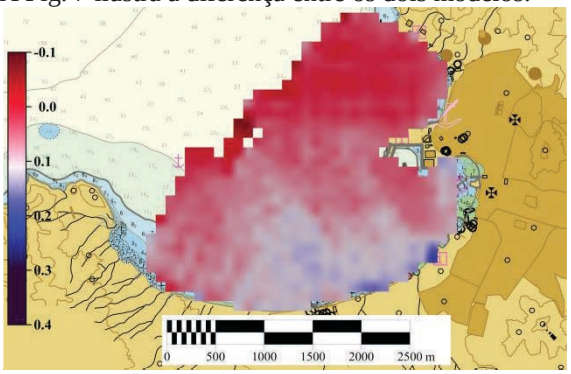


Fig. 7. Superfície de diferenças (m) entre o $MB_{EGM2008ajust}$ e o $MB_{MLS\text{-}DV\text{-}E}$ de 100 m de resolução.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados alcançados, neste estudo, demonstram que a utilização de um MLS-DV-E ou de um modelo global de ondulação do geoide ajustado são soluções possíveis na referenciação vertical de dados batimétricos, garantindo as especificações dos LH.

No entanto, a aplicabilidade das soluções apresentadas a outros locais terá, necessariamente, de ser avaliada primeiro. Em situações futuras, a compensação dos modelos deverá prever uma rede local de observações.

Parte das diferenças encontradas na análise de resultados não são necessariamente resultado dos modelos utilizados, podendo dever-se à incerteza das medições não comuns às três metodologias seguidas.

A comparação entre metodologias de referenciação da informação batimétrica deve ser prática comum para efeitos de controlo de qualidade de um LH, permitindo a identificação de erros nas observações.

REFERÊNCIAS

CARIS (2016). *CARIS HIPS and SIPS 9.0.22 (User Guide)*. CARIS.

Catalão, J., 2009. *GeodPt08 - Um modelo de Geóide para Portugal Continental*. Cartografia e Geodesia 2009, Colégio Nacional de Engenharia Geográfica da Ordem dos Engenheiros, Actas da VI Conferência Nacional de Geodesia e Cartografia.

DGT (2016): http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/geodesia/transformacao_de_coordenadas/modelo_do_geoide/, Direção Geral do Território, sítio consultado em 7 de maio de 2016.

Lopes, C. e Arenga, M. (2006). *Relatório de Missão Representativa (REL MR HI 03/05). Visita técnica a Cabo Verde no âmbito da Hidrografia e Cartografia.* Edição fevereiro de 2006, Instituto Hidrográfico.

MHACV (1946). *Relatório do Chefe de Missão da Missão Hidrográfica do Arquipélago de Cabo Verde.*Edição de abril de 1947.

Nunes, P., Vicente, J., Lobo, A., Miranda, M., Monteiro, C. e Cruz, J. (2013). *Levantamentos hidrográficos com incerteza decimétrica?* 8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. LNEC.

NRC (2016): http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems/tools-applications/10925#ppp, Natural Resources Canada, sítio consultado em 7 de maio de 2016.

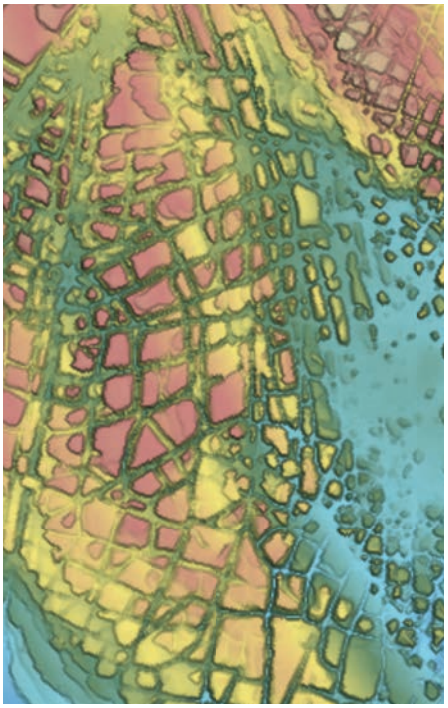
NGA (2016): http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_gis.html, National Geospatial-Intelligence Agency, sítio consultado em 7 de maio de 2016.

OHI, (2008). *S-44 IHO Standards for Hydrographic Surveys", 5ª Ed., Organização Hidrográfica Internacional.*

NAVEGAÇÃO

4as JORNADAS DE ENGENHARIA HIDROGRÁFICA

21, 22 E 23 DE JUNHO DE 2016



Provas de Governo e Manobra

J. Luís (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº49, 1249-093Lisboa; sousa.luis@hidrografico.pt.

Resumo: As provas de governo e manobra permitem avaliar a estabilidade e a manobrabilidade de um navio, bem como os seus elementos evolutivos. O Instituto Hidrográfico possui a capacidade de realizar provas de governo e manobra aos navios da Marinha portuguesa e a outros navios que o solicitem. Atualmente essas provas são efetuadas com recurso a uma aplicação desenvolvida pelo Instituto Hidrográfico, denominada PROGOMAN. Esta aplicação, que corre em qualquer versão do WINDOWS, baseia-se nos padrões recomendados pela Organização Marítima Internacional para este tipo de provas e efetua, de uma forma simples e intuitiva, o tratamento de dados e o traçado das provas.

Palavras-chave: Provas de governo e manobra; elementos evolutivos; PROGOMAN.

1. INTRODUÇÃO

As provas de governo e manobra, também designadas por provas de manobrabilidade, são provas que permitem avaliar a manobrabilidade e a estabilidade de um navio e determinar os seus elementos evolutivos.

Entende-se por elementos evolutivos um conjunto de informação relativa às características de manobrabilidade de um navio, nomeadamente à forma como este reage aos efeitos do leme e do aparelho propulsor. Esta informação é indispensável para uma correta avaliação do comportamento de um navio, nomeadamente em situações de navegação em águas restritas.

Desde há longos anos que o Instituto Hidrográfico (IH) realiza provas de governo e manobra aos navios da Marinha portuguesa e aos de outras entidades, que o solicitem.

Atualmente as provas são realizadas através do programa de aquisição de dados HYPACK e trabalhadas numa aplicação desenvolvida pelo IH, designada por PROGOMAN. Esta aplicação baseia-se nos padrões recomendados para este tipo de provas pela Organização Marítima Internacional (OMI) e executa o tratamento de dados, bem como o traçado das provas. A aplicação PROGOMAN corre sobre as versões mais recentes do WINDOWS e efetua o traçado das provas numa impressora comum.

2. NORMAS DA OMI APLICÁVEIS

Os documentos base da OMI que orientam a realização das provas de governo e manobra são a resolução A.751 (18), de 4 de novembro de 1993 e a resolução MCS.137 (76), de 4 de dezembro de 2002. Estas resoluções intitulam-se "*Interim Standards for Ship Manoeuvrability*" e "*Standarts for Ship Manoeuvrability*", respetivamente, sendo complementadas pela circular 1053 do Comité de Segurança Marítima da OMI, intitulada "*Explanatory Notes to the Standards for Ship Manoeuvrability*", de 16 de dezembro de 2002.

A documentação acima referida serve, sobretudo, para orientar a realização das provas de governo e manobra a navios de comprimento igual ou superior a 100 m, possuindo também alguns critérios que facilitam a interpretação dos resultados obtidos. No entanto, não se aplicam a navios de comprimento inferior a 100 m, nem a embarcações de alta velocidade, pelo que deve haver algum cuidado na aplicação destes *standards* a navios com essas características.

3. METODOLOGIA

De acordo com as recomendações da OMI, os dados a recolher, dependendo do tipo de prova, são os seguintes:

- Posição;
- Proa;
- Velocidade;
- Vento;
- Regime de máquinas[1] (MQ´s);
- Ângulo de leme.

Além destes dados, deve também registar-se a hora, sendo que a OMI recomenda que o intervalo de registo de dados não seja superior a 20 segundos.

Para a aquisição dos dados de hora, proa e posição do navio, o IH utiliza o sistema automático de aquisição e processamento de dados hidrográficos (HYPACK), instalado num computador portátil comum.

O sistema de posicionamento que é normalmente utilizado é o DGPS (*Differential Global Positioning*

[1] Rotações por minuto (RPM).

System) de bordo, pelo que todos os traçados das provas correspondem ao trajeto da antena do navio.

Para obtenção da proa do navio recorre-se a girobússola de bordo ou a uma agulha de fluxo instalada previamente.

Os restantes dados, nomeadamente a velocidade, o regime de MQ´s, o ângulo de leme e o vento são registados manualmente.

4. CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

Os limites meteorológicos recomendados pela OMI para a realização de provas de governo e manobra em navios de comprimento igual ou superior a 100 m são os seguintes:

- Sonda não inferior a quatro vezes o calado;
- Vento não superior a Força 5 da escala de *Beaufort* (17 a 21 nós);
- Vaga não superior a 4 na escala de *Douglas* (1,25 a 2,25 m);
- Corrente uniforme.

Para provas efetuadas em navios de comprimento inferior a 100 m, a OMI não estabelece valores limite, embora se possa extrapolar que para navios menores as condições meteorológicas e de mar devam ser ainda melhores.

5. DESCRIÇÃO DAS PROVAS

Quanto à lista das provas a efetuar, convém referir que a OMI recomenda um programa de provas relativamente reduzido, pois a sua preocupação é garantir que os navios possuem boa manobrabilidade e boa estabilidade e não elaborar um programa de provas que permita a determinação exaustiva dos elementos evolutivos.

Sempre que o IH realiza provas a um dado navio, efetua um programa personalizado de acordo com as necessidades requeridas. Este pode consistir na realização de apenas uma prova (avaliação da manobrabilidade e estabilidade, ou determinação dos elementos evolutivos) ou na realização de ambas.

De seguida efetuar-se-á uma breve descrição dos diversos tipos de provas de governo e manobra.

5.1. Provas de Giração

As provas de giração destinam-se a determinar as curvas de giração dos navios. A OMI recomenda que sejam efetuadas à velocidade de teste (*test speed*), usando 35º de leme ou o máximo leme permitido, para estibordo e bombordo. A velocidade de teste está definida pela OMI como sendo uma velocidade correspondente a pelo menos 90% da velocidade do navio com 85% da potência máxima nas máquinas (MQ). Este tipo de prova destina-se à avaliação da estabilidade e manobrabilidade.

Para a determinação dos elementos evolutivos do navio é necessário realizar diversas curvas de giração a diferentes velocidades e com vários ângulos de leme.

Na realização das provas de giração devem, sempre que possível, efetuar-se 2 rotações consecutivas (equivalentes a 720º) para obter uma estimativa do efeito conjunto do vento, ondulação e corrente.

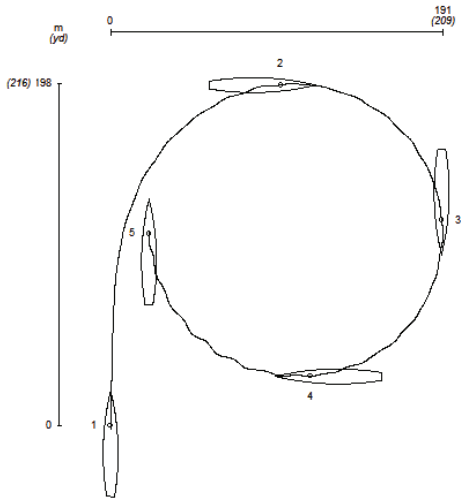


Fig. 1. Curva de giração para estibordo.

Os parâmetros essenciais a obter nas provas de giração são o avanço máximo, o afastamento lateral máximo, o diâmetro tático, o tempo de evolução e o retardo da guinada.

5.2. Provas de Paragem

As provas de paragem, que compreendem as provas de extinção natural e de extinção forçada de velocidade, visam a determinação da distância e do tempo decorridos entre o momento em que foi dada a ordem de parar as MQ´s (no caso da extinção natural) ou de pôr as MQ´s a ré (no caso da extinção forçada de velocidade) até ao momento em que o navio se encontra parado em relação à água.

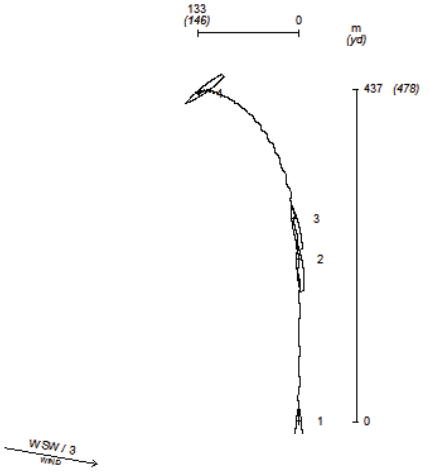


Fig. 2. Prova de paragem.

Este tipo de prova permite avaliar se o navio possui uma boa capacidade de paragem (*stopping ability*),

assim como o tempo de paragem para os vários regimes de MQ´s.

5.3. Provas de zig-zag

As provas de zig-zag destinam-se a avaliar a reação do navio, quando o leme, que se encontrava carregado a um bordo, é carregado para o bordo contrário.

Após o navio se encontrar estável em proa e em velocidade (RPM constante), inicia-se a prova metendo um determinado ângulo de leme a um bordo (1ª execução). Assim que a proa atinge uma determinada variação (normalmente usa-se uma variação de proa igual ao ângulo de leme metido), carrega-se o leme com o mesmo valor de ângulo de leme, mas agora para o bordo contrário (2ª execução).

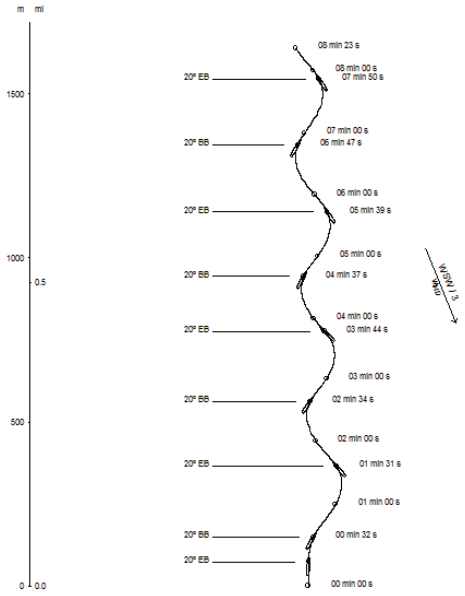


Fig. 3. Prova de zig-zag.

Esta prova tem por objetivo primordial avaliar a capacidade para aguentar a guinada (*yaw checking ability*)[2], a qual se mede através dos excessos da guinada (*overshoot angles*), que representam a variação da proa verificada entre o momento em que é metido o leme para o bordo contrário ao que está introduzido e o momento em que se inverte a marcha da guinada.

5.4. Provas de espiral direta

Esta prova destina-se a avaliar as características do navio em termos de estabilidade dinâmica (*inherent dynamic stability*)[3], determinando a relação entre o ângulo de leme e a marcha da guinada (*rate of turn*).

A prova inicia-se com o navio a rumo e velocidade constantes, carregando-se o leme a um bordo, com um determinado ângulo de leme inicial (normalmente 15º ou 20º). O ângulo de leme é mantido até que se verifique uma variação constante da proa (i.e. até que a marcha da guinada seja constante). Nessa altura, o leme é aliviado em 5º, aguardando-se novamente que o navio atinja uma marcha da guinada constante. Reduz-se então o ângulo de leme em 5º e assim sucessivamente, até que o leme tenha variado de 15º/20º a um bordo até 15º/20º ao outro bordo, regressando outra vez ao bordo inicial.

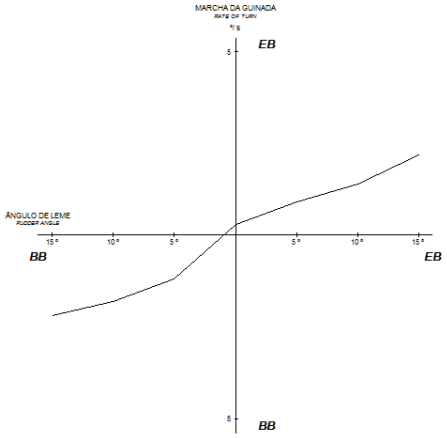


Fig. 4. Prova de espiral direta.

5.5. Provas de desfazer a guinada

Esta prova consiste em levar o leme a meio, após completar uma curva de giração, e mantê-lo assim até se obter uma variação da marcha da guinada constante. Esta prova serve, tal como a anterior, para aferir a estabilidade dinâmica do navio. Se a marcha da guinada tender para zero, então o navio é estável, se tender para um valor residual, então o navio é instável. Este valor para o qual tende a marcha da guinada indica também a magnitude da instabilidade com leme a meio.

6. PROCESSAMENTO DOS DADOS

Após a gravação no HYPACK dos dados das provas acima referidas em ficheiros com extensão ".RAW", estes devem ser exportados para a aplicação PROGOMAN a fim de serem processados.

Inicialmente é necessário criar no PROGOMAN um novo projeto, indicando as características do navio em questão (nome, comprimento, calados, etc). De seguida, basta tratar cada um dos ficheiros com extensão ".RAW" para o tipo de prova correspondente. Esta aplicação é bastante intuitiva, permitindo obter de forma direta os traçados e os gráficos personalizados para cada tipo de prova.

[2] A capacidade para aguentar a guinada é uma medida da reação do navio ao "contra-leme", ou seja à introdução de leme contrário ao já introduzido.

[3] A estabilidade dinâmica representa a capacidade do navio estabilizar rapidamente a uma nova proa, sem necessidade de qualquer ajuda por parte do leme, após uma pequena perturbação que o tenha desviado da proa original.

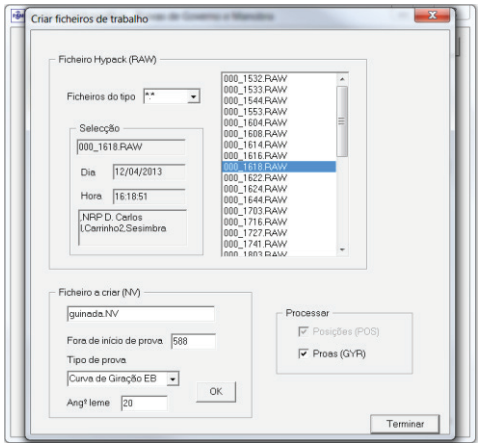


Fig. 5. Processamento de dados no PROGOMAN.

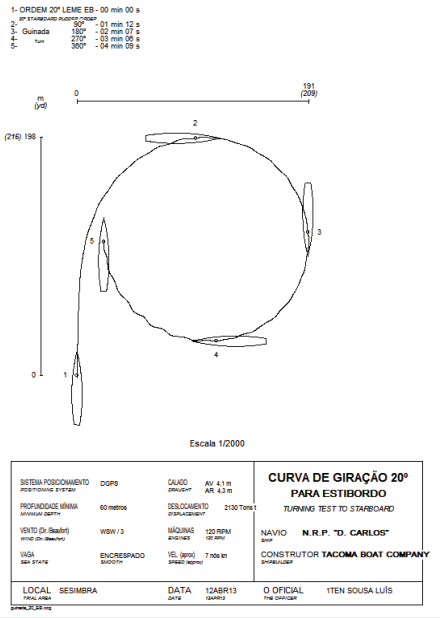


Fig. 6. Exemplo de um traçado efetuado pelo PROGOMAN.

Cumulativamente ao PROGOMAN foi elaborado um Guia de Instruções para as Provas de Governo e Manobra, para não se perder o conhecimento adquirido e esclarecer alguma dúvida, de forma rápida e elucidativa na parametrização do HYPACK, na ligação deste aos diversos equipamentos necessários à realização das provas e na utilização da aplicação PROGROMAN.

7. CONCLUSÕES

O IH é uma entidade com capacidade de realizar provas de governo e manobra aos navios da Marinha portuguesa ou outros que o solicitem.

Baseando-se nos padrões recomendados pela OMI o IH desenvolveu uma aplicação, denominada PROGOMAN, que permite elaborar os traçados e os gráficos das referidas provas. Para tal é necessário adquirir, manualmente e através do programa HYPACK, diversos dados (posição, proa, velocidade, regime de MQ'S e ângulos de leme) para os diversos tipos de provas. De seguida, esses dados são processados de uma forma fácil e intuitiva no PROGOMAN, permitindo ao IH responder a qualquer pedido de realização de provas de governo e manobra e emissão do respetivo relatório de forma rápida e eficiente.

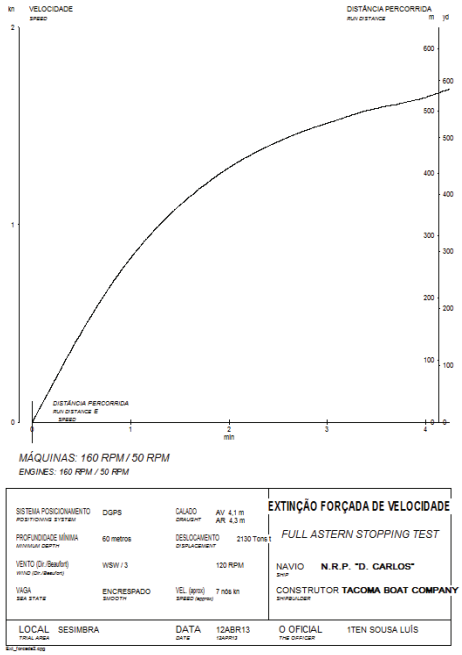


Fig. 7. Exemplo de um gráfico efetuado pelo PROGOMAN.

REFERÊNCIAS

Organização Marítima Internacional, Resolução A751(18), *Interim Standards for Ship Manoeuvrability*, 4 de novembro de 1993.

Organização Marítima Internacional, Resolução MSC.138(76), *Standards for Ship Manoeuvrability*, 4 de dezembro de 2002.

Organização Marítima Internacional (Comité de segurança Marítima), Circular 1053 *Explanatory Notes to the Standards for Ship Manoeuvrability*, 16 de dezembro de 2002.

Estado-Maior da Armada, Instruções de Navegação da Armada (INA) 2(A), 6 de janeiro de 2012.

Instituto Hidrográfico, Relatório Técnico Final NV 03/2013.

Projecto AMOS - serviço de previsão para suporte à navegação e atividade portuária

A. Silva (1), J. C. Leitão (1), P. Galvão (1), P. C. Leitão (1), M. S. Malhadas (1), H. Santos (1), J. Ribeiro (1), E. Aires (1), S. Bartolomeu (1) e J. Rodrigues (1)

(1) HIDROMOD, Rua Rui Teles Palhinha, nº 4, 1º. 2740-278, Porto Salvo. adelio@hidromod.com.

Resumo: No âmbito do projeto AMOS foi desenvolvido um sistema de previsão para suporte às diferentes atividades costeiras como por exemplo, entre outras, a navegação, a atividade portuária ou a gestão de sistemas de tomada e rejeição de água. Este sistema através de um único ponto de acesso (portal do projeto AMOS, http://amos.hidromod.com/) disponibiliza de forma condensada previsões atmosféricas, ondas, correntes e alertas de navegação. Adicionalmente são apresentados alertas de tempestade calculados com base nas previsões disponíveis. Num segundo nível os utilizadores podem explorar previsões numéricas e dados medidos (deteção remota e boias) na forma de gráficos XY (modelo vs. medidas) e campos de vetores e escalares. O utilizador tem também acesso a relatórios de validação quantitativa produzidos de forma regular. O *backoffice* do sistema segue uma arquitetura cliente servidor o que permite disseminar os outputs do projeto AMOS de forma muito eficiente. Os resultados do sistema conseguem chegar às salas de operação dos portos, às pontes dos navios (via o sistema Navtor) ou ao bolso do trabalhador de um porto via uma aplicação mobile.

Palavras-chave: Previsão, alertas, navegação, operação, disseminação, validação.

1. INTRODUÇÃO

Os oceanos são uma das vias mais importantes para o transporte global. Atualmente, 80% do comércio mundial é transportado por mar e mais de 400 milhões de passageiros passam em portos europeus todos os anos. Em 2018, a capacidade total de transporte marítimo deverá ultrapassar 2,1 mil milhões de toneladas (DWT), em comparação com 1,2 mil milhões de DWT em 2008 (JPI-Oceans, 2011). Já a frota mundial está estimada em mais de 100,000 navios em comparação com 77,500 em 2008 (JPI-Oceans, 2011). Com tal grau de desenvolvimento, a necessidade de otimizar os processos e reduzir o risco de acidentes é de grande importância.

A ocorrência de eventos meteooceanográficos extremos pode causar graves perturbações nas operações de navios, quer durante a navegação/manobra quer durante as operações de movimentação de carga. Adicionalmente, com o aumento do transporte marítimo há uma pressão crescente para melhorar a eficiência das operações o que, em alguns casos, pode levar a um aumento dos riscos. Cada vez mais é expectável que grandes navios necessitem de manobrar em áreas mais confinadas ou navegar em canais com pé-de-piloto mais reduzido.

O objetivo do projeto AMOS é oferecer um serviço de previsão de alta resolução de condições meteoceanográficas, incluindo a capacidade de aviso precoce de tempestades no mar, cobrindo as regiões continentais e insulares de Portugal, em escalas compatíveis com os usos e atividades costeiras, para aumentar a eficiência e diminuir os riscos dessas atividades. Estes serviços poderão ser usados para aconselhamento (e alerta) à navegação, mas também para suporte a outras atividades como, por exemplo, a pesca, os desportos náuticos, o combate à poluição costeira, o suporte a missões de busca e salvamento ou a otimização de dragagens em canais de navegação.

A plataforma AQUASAFE (distinguida pela IWA) constitui o suporte informático usado para gerir as diferentes fontes de dados e modelos numéricos usados para fornecer as previsões de alta resolução, controlar a interface com os utilizadores através de diferentes clientes (desktop, web, móvel) e emitir relatórios e alertas automáticos. Estas previsões estão igualmente integradas na plataforma NavStation, da empresa NAVTOR, para otimização do planeamento rotas através da consideração das previsões locais. A plataforma NavStation já é amplamente utilizada como suporte para a atualização das Cartas Náuticas Eletrónicas a bordo, incluindo os serviços (Electronical Navigational Charts), ADP (Admiralty Digital Publications), e-NP (electronic Nautical Publications).

2. PLATAFORMA AQUASAFE

O serviço de alertas do projeto AMOS tem na sua génese as seguintes componentes: 1) servidor, 2) análise e verificação e 3) disseminação. A componente do servidor é responsável por toda a gestão de dados (e.g., satélite, redes *in situ*, modelos externos) e execução de modelos numéricos em modo de previsão. Todos os dados que são adquiridos através de *download* são considerados

como fontes externas e toda a informação gerada com recurso a modelos implementados dentro da plataforma AQUASAFE como fontes internas. Toda a informação que é gerada no âmbito deste processo tem subjacente uma política de privacidade e obedece a *standards* de formatos e de meta-informação garantindo que todos os dados são catalogados mediante determinados pré-requisitos, nomeadamente, tipo de dado, provedor do dado, restrições de uso, local de medição, profundidade de medição, parâmetro medido, entre outros. A segunda componente tem como objetivo garantir que toda a cadeia de processos necessária para produzir as previsões é executada de forma efetiva. Esta cadeia de processos é complexa, envolvendo a transferência de grandes volumes de dados em diferentes formatos e resoluções, o tratamento dos dados de forma a verificar a respetiva integridade e traduzi-los para formatos *standard* e a execução de diferentes modelos com dependências entre si. Por fim, a terceira e última componente, consiste na divulgação da informação para os utilizadores finais. A disseminação pode ser feita diferentes tipos de clientes informáticos (desktop, web, móvel) e através de relatórios automáticos disseminados para uma lista predefinida de *emails* que podem ser enviados regularmente ou, no caso de alertas, obedecer à ocorrência de um evento.

Estes sistemas permitem a integração de diversas componentes e a gestão de diferentes tipos de dados oceanográficos proporciona uma melhor eficiência nos serviços de gestão ambiental costeira. Adicionalmente também fornecem um serviço mais abrangente e mais robusto a menor custo, quer em termos de esforço de recursos humanos e de gestão da informação de dados.

3. PREVISÃO

A metodologia de modelação aplicada à região de Portugal Continental, Madeira e Açores é suportada por uma filosofia de modelos encaixados para simulação da hidrodinâmica e propagação de ondas explorados pela Hidromod. No caso das previsões atmosféricas é também seguida uma abordagem de modelos encaixados mas neste caso são utilizados fornecedores externos de dados (e.g. MeteoGalicia e IberMeteo).

Esta metodologia encontra-se muito disseminada a nível global. Sistemas de modelação de ampla divulgação como é o caso do WRF (previsão atmosférica) e SWAN (previsão de ondas) seguem o mesmo tipo de abordagem de *downscaling*.

No que diz respeito à previsão hidrodinâmica existem também diversos sistemas que recorrem a este tipo de abordagem como é o caso do ROMS, Delft3D e MOHID. Este último tem sido utilizado pela Hidromod em diversos sistemas operacionais nacionais (Silva *et al.*, 2013, Leitão *et al.*, 2013) e internacionais (Bartolomeu *et al.*, 2014, Leitão *et al.*, 2015) e por outras instituições (IST, Portugal, Suez Environment, França (Delpey *et al.*, 2014), Kordis, Coreia, MeteoGalicia, Espanha).

A metodologia de modelos encaixados seguida com o modelo MOHID (Leitão *et al.*, 2005) tem-se revelado uma solução eficiente que permite integrar processos desde a escala dos quilómetros, como é o caso da maré, com processos da escala das centenas de metros, como é o caso de plumas de estuários e rios. A comunicação entre modelos é feita *one-way*, ou seja, os modelos de maior escala influenciam os modelos de menor escala, mas o contrário não ocorre.

4. VALIDAÇÃO

A base para a validação de todo o sistema de previsão são: marégrafos, boias e estações meteorológicas. Na Fig. 1 apresenta-se a localização dos sensores disponíveis em tempo real para Portugal Continental e áreas adjacentes. Também existe para os Açores e para a Madeira mas em menor número.

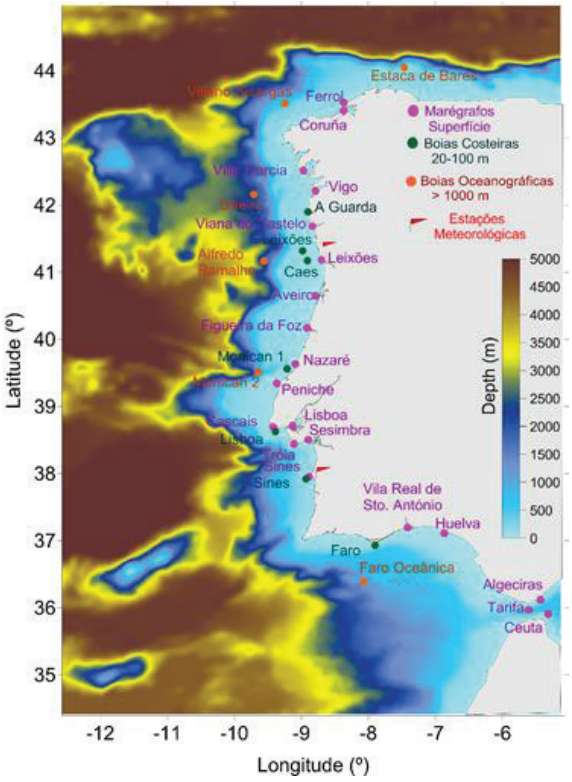


Fig. 1. Localização dos marégrafos, boias costeiras, boias oceanográficas e estações meteorológicas disponíveis para Portugal Continental.

Os marégrafos (círculos rosa), as boias costeiras (círculos verde) e oceanográficas (círculos laranja) sob o domínio português são mantidas pelo IH e as de domínio espanhol pelos Puertos del Estado. Os parâmetros disponíveis incluem três classes (atmosféricos, ondulação e hidrodinâmicos), podendo incluir dados à superfície ou em diversas profundidades.

O acesso a estes dados em tempo real permite uma validação qualitativa dos dados medidos com as previsões disponíveis por comparação visual (Fig. 2).

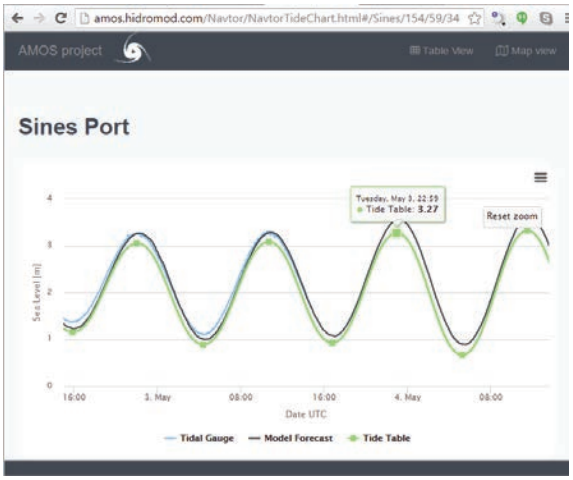


Fig. 2. Comparação via página do projeto AMOS dos dados medidos pelo marégrafo de Sines com previsões do modelo MOHID e a tabela de maré.

Adicionalmente permite validações quantitativas que visam aferir estatisticamente a precisão dos modelos de previsão (RMSE, bias, correlação, etc.). Uma pergunta importante a que o processo de validação tem de responder é a fiabilidade das previsões função dos dias de previsão. A validação de um modelo de previsão não deve ser feita apenas para o primeiro dia de previsão mas para os vários dias que são publicados resultados de previsões.

O sistema AQUASAFE permite gerar e disseminar (via email, web) de forma automática relatórios em diferentes formatos de validação (pdf, word, xls) onde uma das funcionalidades é mostrar os parâmetros estatísticos de validação função do dia de previsão. Nas Fig. 3 e Fig. 4 apresentam-se exemplos de comparações com medidas para o período de 24 de Abril a 4 de Maio de 2016 geradas de forma automática e disseminadas via relatórios em pdf.

Na Fig. 3 é possível constatar que no caso da intensidade do vento o GFS mantém um RMSE relativamente estável ao longo dos 10 dias de previsão mas em termos de correlação existe uma quebra logo ao 2º dia e uma segunda quebra ao 8º dia.

Na Fig. 4, onde são apresentados comparações de altura significativa da onda, pode verificar-se que, neste caso, o RMSE só aumenta a partir do 6º dia de previsão. No que diz respeito à correlação esta apresenta uma tendência de diminuição desde o primeiro dia e a partir do 5º dia cai bruscamente.

Os produtos de satélite acessíveis via AMOS correspondem às seguintes soluções disponibilizadas pela Marine Copernicus: Global Ocean OSTIA L4 senso, European Ocean-Sea L4 multi-sensor e Global Ocean the IFREMER CERSAT Global Blended Mean Wind Fields. Este tipo de produtos permite validar a variabilidade espacial das previsões (Fig. 5).

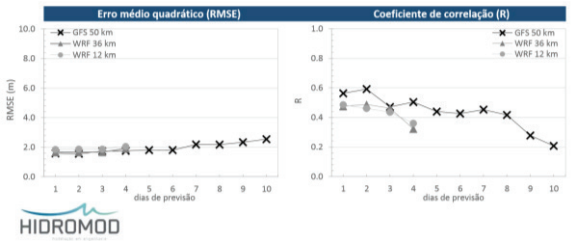


Fig. 3. Comparação do RMSE e da correlação das previsões de intensidade do vento do GFS (NOAA) com duas soluções de WRF (MeteoGalicia) para Sines para diferentes dias de previsão.

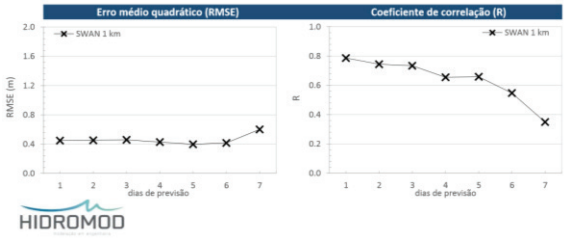


Fig. 4. RMSE e correlação das previsões de altura significativa do SWAN (Hidromod) para Sines função dos dias de previsão.

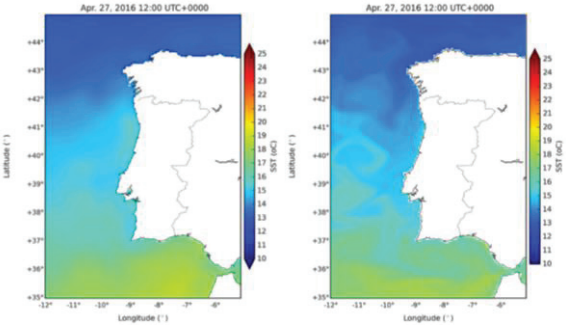


Fig. 5. Temperatura à superfície para o dia 27 de Abril de 2016 às 12h UTC: OSTIA (esquerda) e MOHID (direita).

5. DISSEMINAÇÃO

Um dos objetivos do projeto AMOS é disseminar as previsões de forma *standard* (web e mobile) e visualmente simples (tabelas, gráficos XY, mapas) para zona económica exclusiva de Portugal.

Adicionalmente, para além desta disseminação *standard*, foi feito igualmente um primeiro ensaio de disseminação de previsões de alta resolução para diferentes pontos do globo, nomeadamente: Nova York, Santos, Singapura, Sines e Klang (Malásia) para serem testadas na plataforma NavStation (Fig. 6). Numa primeira fase foram disponibilizadas apenas correntes de alta resolução em formato NetCDF que podem ser lidas pela plataforma NavStation, permitindo a qualquer navio onde esta plataforma esteja disponível sobrepor às cartas náuticas digitais previsões de correntes com resoluções da ordem dos 50 m (Fig. 7).

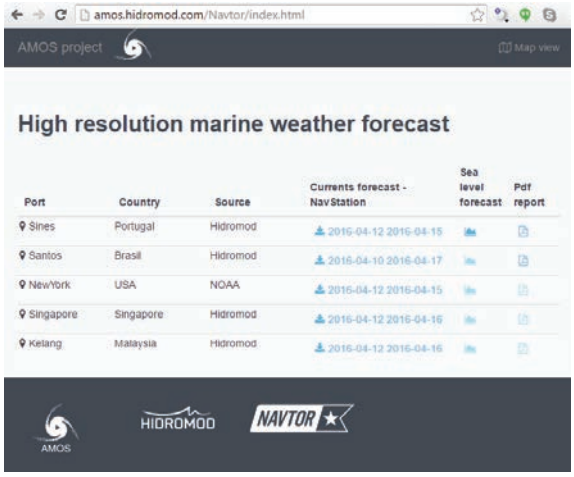


Fig. 6. Tabela de previsões de correntes de alta resolução disponível em formato NetCDF via web para 5 portos numa primeira fase.



Fig. 7. Correntes de alta resolução previstas pela Hidromod com o modelo MOHID (Bartolomeu et al., 2014) sobrepostas à carta náutica digital na plataforma via plataforma NavStation.

6. CONCLUSÕES

Em resultado do projeto AMOS foi implementado um sistema de integração de dados em tempo real e de previsão de parâmetros meteoceanográficos de alta resolução que tem por objetivo principal disponibilizar informação, através dum único ponto de acesso, para a zona económica exclusiva de Portugal. O sistema possui em qualquer caso as características necessárias para poder disponibilizar informação similar para qualquer ponto do globo.

A plataforma foi estruturada de forma a poder vir a crescer no futuro com a integração doutro tipo de informação relevante como seja por exemplo a relativa aos navios ou a operações em terra.

A adoção generalizada deste tipo de abordagem está igualmente a ser incentivada ativamente pela União Europeia que pretende promover sistemas que permitam fazer a fusão da multiplicidade de dados atualmente disponíveis que, se devidamente transformados em informação, poderão representar uma mais-valia muito relevante para a segurança marítima, a vigilância costeira e outros utilizadores do mar.

Agradecimentos

O presente trabalho é parte integrante do projeto AMOS que é parcialmente financiado pelo programa EEA Grants no âmbito da área programática focada na "Gestão Integrada das Águas Marinhas e Costeiras". Para mais informação sobre o programa EEA Grants visite http//www.eeagrants.gov.pt/

REFERÊNCIAS

Bartolomeu, S., Malhadas, M., Leitão, P., Dias, J. Influence of MeteOcean processes on MSYM sea level predictions in the Singapore and Malacca Straits. 3.as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, 24-26 June 2014, Lisbon, Portugal. Extended abstracts: 155-158.

Delpey, M.T., Ardhuin, F., Otheguy, P., Jouon, A. Effects of waves on coastal water dispersion in a small estuarine bay. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2014; 119: 1–17.

JPI-Oceans, 2001. Healthy and Productive Seas and Oceans. Vision document, 2011.

Leitão, J., Leitão P., Silva, A., Galvão, P., Ribeiro, J., Malhadas, M., Santos, H., Aires, E. Sistema Aquasafe nos portos de Leixões e Viana do Castelo. 8ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária LNEC, 10 e 11 de Outubro de 2013.

Leitão, P., Coelho, H., Santos, A., Neves, R. Modelling the main features of the Algarve coastal circulation during July 2004: A downscaling approach. Journal of Atmospheric & Ocean Science. 2005; 10(4): 421-462.

Leitão, P., Leitão J., Ribeiro, R., Sampaio, A., Galvão, P., Ribeiro, J., Silva, A. (2015). Serviços de previsão de alta resolução de condições meteo-oceanográficas e de eventos de poluição costeira. VIII congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa.

Silva, A.J.R., Leitão, J.C., Leitão, P.C., Galvão, P., Ribeiro J., Carneiro, E. & Pinto, J., 2013, Sistemas Operacionais para suporte à atividade portuária, 8ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, LNEC, Outubro de 2013.

Assinalamento marítimo – Análise de risco da via navegável

Jorge Eduardo dos Santos Teles (1)

(1) Direção de Faróis, Estrada Marginal 2770-210 Paço de Arcos. santos.teles@marinha.pt.

Resumo: O assinalamento marítimo é, na sua essência, uma medida de mitigação que tem como objetivo primordial a segurança da navegação. Nesse âmbito, é fundamental identificar quais os riscos existentes nas vias navegáveis e qual a melhor estratégia para os mitigar.
De forma a sistematizar a metodologia de análise de risco a ser seguida pelas diversas autoridades nacionais, a *International Association of Marine Aids and Lighthouse Authorities* (IALA), como entidade reguladora do assinalamento marítimo internacional, desenvolveu um conjunto de normas e procedimentos que, quando aplicadas, disponibilizam às autoridades nacionais uma importante ferramenta de apoio à decisão.
Estas ferramentas têm três vertentes complementares entre si, uma componente qualitativa (*Ports and Waterways Safety Assessement* - PAWSA), uma componente quantitativa (*IALA Waterways Risk Assessement Program* - IWRAP) e uma componente de simulação.
De forma disponibilizar ao decisor uma avaliação efetiva do risco da via navegável, a análise de risco deve englobar as três componentes (qualitativa, quantitativa, simulação).

Palavras-chave: assinalamento, risco, navegação, tráfego, IALA.

1. INTRODUÇÃO

Durante muitos anos a introdução e implantação de ajudas à navegação (boias, balizas, farolins e faróis), embora encarada e reconhecida como uma necessidade para a segurança da navegação, raramente resultava de uma análise efetiva de qual o risco ou riscos que supostamente pretendia mitigar. Efetivamente, embora fosse consensual que as ajudas à navegação deviam obedecer a um conjunto de regras e normas, essencialmente relativas à sua função e características, por princípio não era tido em conta o risco associado à via navegável e ao tráfego existente, e nos raros casos em que tal era feito, a análise baseava-se apenas em conhecimentos empíricos. Acresce que na maioria dos casos, a implantação das ajudas à navegação resultava da ocorrência de acidentes ou incidentes prévios, assumindo assim um carater mais corretivo do que preventivo.



Figura 1- exemplo de ajudas à navegação.

Não obstante, a *International Maritime Organization* (IMO), através da regra 13 do Capítulo V da Convenção SOLAS (*Safety of Life At Sea*), atribui ao Estado Costeiro a obrigação de providenciar aos navegantes, ajudas à navegação em quantidade e composição adequada ao volume de tráfego e grau de risco da via navegável (SOLAS, 1974).

Desta obrigação decorre diretamente a necessidade de o Estado Costeiro avaliar os riscos inerentes à prática das vias navegáveis, para poder de seguida determinar quais as medidas de mitigação adequadas (assinalamento marítimo) para diminuir esse risco.

2. METODOLOGIA

Decorrente da necessidade de cumprir com esta obrigação internacional, algumas Autoridades Nacionais responsáveis pelo assinalamento marítimo reconheceram a necessidade de desenvolver critérios e metodologias que pudessem sistematizar e quantificar o risco existentes nas vias navegáveis, e qual o efeito (previsível) das ajudas à navegação a implementar.

Neste âmbito, a *International Association of Marine Aids and Lighthouse Authorities* (IALA), como entidade reguladora do assinalamento marítimo internacional, tem desenvolvido um conjunto de normas (recomendações e guias) e de ferramentas (programas) que permitem uma metodologia coerente de apoio à análise de risco nas vias navegáveis. Esta metodologia, conforme exemplificada na figura 2, não se limita à análise de risco *per si* mas engloba essa análise num processo mais abrangente, integrado e iterativo de análise, decisão e implementação, com uma monitorização constante dos resultados e ou alterações resultantes na via navegável, com o objetivo de reduzir o nível de risco existente.



Figura 2 – Metodologia da IALA para o processo de gestão do risco (IALA, 2013).

Neste processo é perfeitamente visível que, sendo a análise de risco uma ferramenta essencial ao processo de decisão, a subsequente decisão e a sua implementação, são fundamentais para que se obtenham os resultados desejados (melhoria da segurança da via navegável), ou seja, mais do que análise de risco, as autoridades responsáveis devem adotar uma política de gestão do risco.

Para tal é importante compreender que o risco é função de dois fatores distintos, a probabilidade de ocorrência e as consequências (impacto) dessa ocorrência (figura 3).

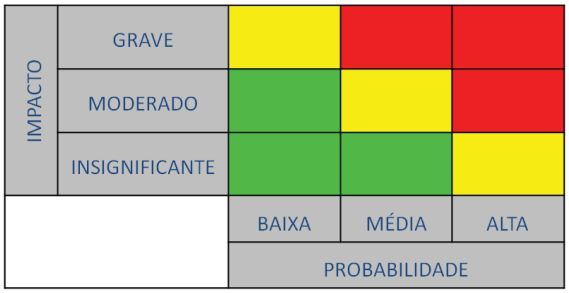


Figura 3 – Exemplo de matriz de risco.

Desta forma, podemos ter um evento com uma probabilidade de ocorrência muito reduzida, mas cujas consequências são catastróficas (nível de risco elevado), ou eventos com uma probabilidade de ocorrência elevado, mas cujas consequências são desprezáveis (nível de risco baixo).

É importante ter presente que o nível de risco nunca será zero, mesmo após a implementação das medidas de mitigação (ajudas à navegação) e que como tal o decisor tem sempre que definir um nível de risco que considere aceitável/exequível de alcançar. Este conceito é conhecido internacionalmente como ALARP (*As Low As Reasonably Possible*).

3. FERRAMENTAS

Focando em particular no processo de identificação e quantificação dos riscos existentes na via navegável (análise de risco), a IALA criou um conjunto de ferramentas que permitem sistematizar os fatores de risco e as suas frequências (probabilidades).

Estas ferramentas englobam 3 componentes distintas: análise qualitativa, análise quantitativa e simulação.

Para a análise qualitativa foi desenvolvido o PAWSA (*Ports and Waterways Safety Assessement*) onde o enfoque é colocado na experiência das entidades com interesse e / ou conhecimento da via navegável (*stakeholders*), procurando utilizar a sua esperiência de forma a identificar e prioritizar os diversos fatores de risco presentes, bem como identificando a localização dos mesmos (figura 4).

CONDIÇÕES DOS NAVIOS	CONDIÇÕES DO TRÁFEGO	CONDIÇÕES DE NAVEGAÇÃO	CONDIÇÕES DO CANAL DE NAVEGAÇÃO	CONSEQUÊNCIAS A CURTO PRAZO	CONSEQUÊNCIAS A LONGO PRAZO
Qualidade dos navios	Grande calado	Navegação diurna/ noturna	Profundidade	Danos pessoais	Impactos na segurança e saúde
Competência da tripulação	Pequeno calado	Estado do mar	Largura do canal de navegação	Derrames de combustível	Impacto no estilo de vida
Tipo de tráfego	Embarcações de pesca	Condições de vento	Obstruções á visibilidade	Derrame de substâncias perigosos	Impacto na vida marinha
Densidade de tráfego	Embarcações de recreio	Correntes	Complexidade do canal de navegação	Dano na propriedade	Espécies em vias de extinção
Natureza da carga	Embarcações de alta velocidade	Restrições á visibilidade	Tipo de fundo	Obstrução do canal de navegação	Danos na linha de costa
		Gelo	Estabilidade do fundo		Danos em recifes
		Destroços			Impacto económico

Figura 4 – Exemplo de fatores de risco identificados na via navegável.

Numa segunda fase são identificadas as medidas de mitigação passiveis de ser implementadas e o efeito previsível que venham a ter no nível de risco, procurando diminuir a probabilidade e / ou as consequências dos eventos de risco.

Esta metodologia permite aos intervenientes identificarem uma relação direta causa / efeito entre as medidas de mitigação propostas e os riscos previamente identificados, ajudando à perceção da importância das mesmas e à aceitação dos eventuais constrangimentos que possam advir da sua implementação.

Na vertente da análise quantitativa, foi desenvolvido um programa (*IALA Waterways Risk Assessement Program* - IWRAP) que permite fazer a análise probabilística dos eventos de risco passiveis de ocorrer na via navegável, ao nível das colisões e encalhes.

O algoritmo matemático utilizado para o cálculo das probabilidades de eventos, foi desenvolvido pela IALA em cooperação com a *Technical University of Denmark* e a *Gatehouse*, e teve como base os estudos efetuados por Fujii, MacDuff e posteriormente por Kinzo Inoue, ao nível das

interações entre navios em espaços confinados, e a sua dependência do fator humano (Friis-Hansen & Simonsen, 2002).

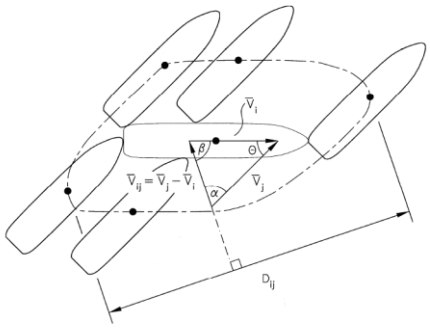


Figura 4 – Interação entre navios (elipse de conforto).

O modelo foi posteriormente aferido e calibrado através da análise de vias navegáveis com historial de eventos bem documentado, assegurando assim que os resultados extraídos do modelo tenham uma aderência consistente com a realidade. Não obstante, os fatores de causalidade são sempre passiveis de adequação face à especificidade da via navegável em análise.

Para obter resultados fiáveis e coerentes com o IWRAP, é essencial a existência de dados estatísticos do tráfego que circula na via navegável, ao nível das posições, trajetórias, velocidades e tipos de navio, cuja introdução no modelo é fundamental para obter a distribuição do tráfego no canal de navegação (figura 5) e para a posterior análise de risco.



Figura 5 – Exemplo da distribuição do tráfego no canal de navegação.

Com base nestes dados, o IWRAP vai determinar as probabilidades de ocorrência na configuração atual da via navegável (cenário presente), identificando as probabilidades de ocorrência por evento (figura 6) e os locais de maior probabilidade de ocorrência de cada evento (figura 7).

Incidente	Cenário atual	
Encalhe sob propulsão	0,256	Incidentes/ano
Encalhe sem propulsão	0,054	Incidentes/ano
Total de encalhes	0,311	Incidentes/ano
Ultrapassagem	0,013	Incidentes/ano
Roda a roda	0,080	Incidentes/ano
Cruzamento	0,022	Incidentes/ano
Junção	0,019	Incidentes/ano
Curva	0,019	Incidentes/ano
Área	0,084	Incidentes/ano
Total de colisões	0,2401	Incidentes/ano

Figura 6 – Indicação das probabilidades de incidente por tipo de evento.

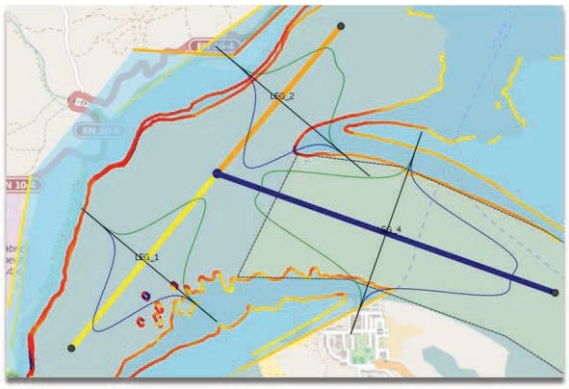


Figura 7 – Indicação dos locais com nível de risco mais elevado.

Desta forma é possível ao decisor identificar quais as áreas prioritárias para atuar ao nível da redução do risco, através da implementação de medidas de mitigação.

Numa fase subsequente, o IWRAP permite ainda simular o efeito que eventuais alterações da via navegável (assinalamento) podem representar para a evolução do nível de risco atual (numa fase prévia à sua efetiva implementação). Esta simulação é especialmente importante para evitar a introdução de medidas de mitigação que possam ter efeitos colaterais indesejados, permitindo assim poupanças económicas e evitando riscos desnecessários.

Como exemplo, a introdução de uma ajuda à navegação que limite a largura de um canal para proteção de um baixio (diminuição do risco de encalhe), pode representar um aumento do risco de colisão por aumento do volume de tráfego ao longo do eixo central do canal.

4. CONCLUSÕES

Embora atualmente exista uma consciência mais alargada da importância do conhecimento dos riscos existentes nas vias navegáveis, subsiste em muitas entidades com responsabilidade nesta área uma clara dificuldade em completar o processo decisório, quer através da decisão em si (aprovação das medidas a implementar), quer através da própria

implementação das soluções aprovadas (dificuldades orçamentais e / ou de gestão).

Com efeito, sendo a análise de risco inegavelmente uma ajuda importante ao processo decisório, a sua eficácia depende da capacidade de implementar as soluções identificadas, bem como de, em tempo útil, responder à evolução / alteração dos fatores de risco.

Desta forma, a gestão de risco deve ser um processo dinâmico e iterativo, procurando adaptar as medidas de mitigação já implementadas (ou a implementar) às alterações da morfologia da via navegável, ou aos padrões e tipologia do tráfego, sempre com o objetivo de aumentar a segurança da navegação.

REFERÊNCIAS

Friis-Hansen, P.; Simonsen, B.O. (2002) "GRACAT: software for grounding and collision risk analysis". *Marine Structures* 15, pp.383-401.

IALA Recommendation O-118 On Risk Management, Edition 3, May 2013.

International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974.

Utilização do Simulador de Navegação no desenvolvimento de competências não técnicas para os Oficiais de Quarto à Ponte

J. Basso (1) e V. Conceição (2)

(1) Base Naval de Lisboa, – Alfeite 2810-001 Almada, cruz.basso@marinha.pt

(2) Escola Naval, Base Naval de Lisboa – Alfeite 2810-001 Almada

Resumo: A navegação marítima tem-se caracterizado por uma maior complexidade das operações, justificada por razões organizacionais, regulamentares e tecnológicas. Neste contexto e focado na redução dos acidentes marítimos, os fatores humanos têm evidenciado a sua relevância, pelo que é vital compreender a relação do elemento humano com o contexto das suas atividades. Com o propósito de estudar os processos de desenvolvimento das competências não técnicas, essenciais à função de Oficial de Quarto à Ponte, foi realizado um estudo sobre a utilização do Simulador de Navegação da Escola Naval. A primeira parte deste artigo inclui uma revisão da literatura sobre os factores humanos. A segunda parte apresenta um estudo baseado em inquéritos aos utilizadores do simulador, por forma a aferir a forma como este contribui para o desenvolvimento das competências não técnicas. A análise, realizada com Software SPSS, permite já inferir algumas recomendações para configuração das sessões de treino nos simuladores de navegação.

Palavras-chave: Competências não técnicas, simulador de navegação, fatores humanos, acidentes marítimos.

1. INTRODUÇÃO

No âmbito de um trabalho de investigação sobre o desenvolvimento de competências não técnicas, efetuou-se uma observação dos alunos da Escola Naval, enquanto utilizadores do Simulador de Navegação da Escola Naval (SIMNAV), bem como dos formadores que utilizam o SIMNAV e o simulador de Navegação do Centro Integrado de Treino e Avaliação Naval (CITAN), em sessões práticas direcionadas ao treino das funções de Oficial de Quarto à Ponte (OQP).

O objetivo deste trabalho prende-se com o facto de o treino e a avaliação dos militares ser essencial, pois só guarnições altamente treinadas e navios operacionais podem, a qualquer momento, efetuar uma missão real de salvamento ou de outra natureza, com um elevado padrão de desempenho. O treino pode ser efetuado de duas formas distintas, no mar a bordo das unidades navais, ou em terra nos simuladores de que a Marinha Portuguesa (MP) dispõe.

O comandante de um navio é o responsável máximo pela segurança do navio a navegar. Como tal, é da sua incumbência garantir e tomar as ações necessárias para evitar qualquer tipo de perigo ou acidente. Contudo, apenas em momentos mais sensíveis é que o comandante toma conta da manobra do navio, sendo que durante a navegação é delegada nos OQPs a execução da navegação (EMA, 2012).

São incumbências dos OQP tomar conta da manobra do navio (nos termos determinados pelo Comandante), executar o plano de navegação, dirigir e controlar o pessoal de quarto à ponte, entre outros (EMA, 2012). É ainda delegada no OQP a competência para garantir a segurança do navio, evitando quaisquer perigos e/ou acidentes que possam surgir no decorrer da navegação. A certificação de um OQP só poderá ser concedida pelo comandante do respetivo navio, tendo como requisitos (EMA, 2012):

i. Conhecimento e treino básico proporcionado pela Escola Naval ou por outros cursos;
ii. Conhecimentos e treino em matéria específica do navio;
iii. Cumprimento de um período de tempo como Adjunto ao OQP;
iv. O parecer de um OQP certificado de como foi cumprido o período estipulado.

Os requisitos tidos como "essenciais" para a certificação do OQP, bem como de toda a equipa da ponte, estão claramente direcionados para uma vertente mais técnica, tanto em sessões de simulador como em plena navegação. Apesar das competências técnicas serem importantes para a segurança da navegação, não são de todo suficientes (Long e O'Connor, 2011). Na 15ª Edição do *Watch Officer's Guide*, o Almirante Stavridis e o Capitão Girrier identificaram o conhecimento técnico como uma de sete caraterísticas fundamentais para um OQP (Long e O'Connor, 2011). As restantes caraterísticas incluem conceitos como decisão e liderança, claramente dentro do campo das competências não técnicas (Grech *et al.*, 2008; Long e O'Connor,

2011), sendo que competências não técnicas podem ser consideradas como competências cognitivas e sociais, que complementam as competências técnicas dos trabalhadores (Flin *et al.*, 2008).

No que diz respeito a este tipo de competências e à sua importância para a segurança da navegação, têm sido feitas várias tentativas para adaptar à Marinha Mercante e às várias Marinhas de Guerra os princípios adotados na indústria da aviação (Devitt e Holdford, 2010), na qual já foi feito um vasto trabalho. Um exemplo do trabalho que tem vindo a ser desenvolvido na indústria da aviação é o NOTECHS *Behavioural Marker System*, elaborado no âmbito do projeto da União Europeia *"Joint Aviation Requirements Translation and Elaboration of Legislation*" (JAR TEL), e que permite avaliar as competências não técnicas dos pilotos. Um projeto demonstrativo do esforço que se tem vindo a fazer no sentido de alargar estes princípios às várias Marinhas, é o *Nontechnical Skills for Officers of the Deck* (NTSOD) elaborado por Long e O'Connor (2011) para a Marinha dos Estados Unidos da América (US Navy), que não é mais que um sistema protótipo (Fig.1), que permite avaliar os oficiais de quarto à ponte no que diz respeito a competências não técnicas através de indicadores comportamentais.

APPENDIX. NONTECHNICAL SKILLS FOR OFFICERS OF THE DECK (NTSOD) RATING FORM

Ship_____ Trainee_____ Watch _____

Date_____ Assessor_____ Evolution_____

Category	Category Rating*	Element	Element Rating*	Notes
Leadership		Managing Watch Team		
		Coping with Stress		
Communications		Providing Information		
		Issuing Orders		
Situational Awareness		Gathering Awareness		
		Understanding Awareness		
		Anticipating Future Events		
Decision Making		Analytical Decision Making		
		Following Orders & Procedures		
		Intuitive Decision Making		

* 1 = Unsatisfactory; 2 = Marginal; 3 = Satisfactory; 4 = Outstanding; NO = Not Observed

1 = Unsatisfactory: Watchstander could endanger ship and crew without considerable improvement.
2 = Marginal: Watchstander requires improvement.
3 = Satisfactory: Watchstander performed at an acceptable level, but room for improvement exists.
4 = Outstanding: Watchstander performed at a consistently high level.
NO = Not Observed: Element or skill was not observed during this evolution.

Fig. 1. Modelo de avaliação NTSOD (Long e O'Connor, 2011).

Tem havido um claro aumento no uso de simuladores com o objetivo de treinar a gestão de crises e emergências na indústria marítima. Os primeiros simuladores foram introduzidos há mais de 30 anos, possibilitavam o treino do uso do radar para evitar colisões. Estes primeiros simuladores dividiam-se em cubículos, onde as equipas treinavam competências técnicas sob a orientação de um instrutor (Barnett et al., 2003). Em 1970 surgiram os primeiros simuladores de pontes de navios que possibilitavam a prática de navegação noturna, com apenas algumas luzes no ambiente que simulavam outros navios e luzes de costa. Seguidamente começaram a ser ministrados vários cursos em ambiente simulado, como o *Bridge Team Management* (BTM), atualmente utilizado em diversos simuladores de todo o mundo, e vocacionado para o treino de competências técnicas como navegação em canais estreitos (Deritt e Holdford, 2010). Em 1979 foi ministrado o primeiro curso de *Cockpit Resource Management*, implementado pela indústria de aviação civil, que se centrava no estudo do fator humano em situações de elevado stress e ambiente de alto risco (Deboo, 2013). Mais tarde passou a ser designado por Crew Resource Management (CRM). Em 1992 começou a ser desenhado o *Bridge Resource Management* (BRM); posteriormente este viria a ser integrado no *STCW 95 Code Section B-VII/2, Part 3-1*. Este curso, hoje em dia ministrado na *Warsash Maritime Academy*[1], foi adaptado dos cursos da indústria da aviação, foca-se puramente no treino de competências não técnicas inseridas num contexto técnico, sendo que nem sempre requer o uso de simuladores (Barnett et al., 2003). O BRM é assente no uso e coordenação de todas as competências, conhecimentos, experiências e recursos disponíveis para a equipa da ponte realizar ou atingir as metas estabelecidas de segurança (Deboo, 2013).

A maioria das organizações que envolvem situações críticas e de risco no trabalho, promovem o treino e formação no domínio da gestão de emergências, e na forma como se lida com crises que possam por em causa a segurança dos intervenientes. Contudo, são poucas as organizações que procuram avaliar este tipo de competências no seu pessoal. Como são estas competências avaliadas? Que critérios de avaliação são tidos em conta? (Barnett et al., 2003)
Tendo em conta as necessidades da MP e as capacidades de treino e ensino que esta oferece, através do SIMNAV e do CITAN, pretendeu-se analisar e expor a forma como estes têm sido utilizados, por forma a melhorarmos o nível de ensino e formação dos futuros OQPs.

2. METODOLOGIA

Em primeiro lugar, apesar de já se possuir algum conhecimento acerca do funcionamento do SIMNAV, procedeu-se à observação sistemática de duas sessões de formação direcionadas ao desenvolvimento de competências não técnicas no simulador da Escola Naval, com o intuito de se obter uma perceção das sessões de formação no simulador, externa ao ciclo formando-formador.

Em segundo lugar, foi aplicado um questionário constituído por questões de escolha múltipla, de ordenação e de resposta livre, aos alunos dos 2º, 3º, 4º e 5º anos da Escola Naval (139 inquiridos). Antes do questionário ser aplicado, foi efetuado um pré-teste a 3 indivíduos da amostra, por forma a validar a adequabilidade do questionário. Para a análise das respostas, foi utilizado o *software* SPSS v.20. Este

[1] Escola de treino marítimo integrada na Universidade *Southampton Solent*. É uma das escolas do Reino Unido responsáveis pelo treino e formação da *British Merchant Navy*.

questionário teve como objetivo aferir a opinião dos alunos da Escola Naval relativamente à utilização do simulador de navegação da Escola Naval e à forma como este é aproveitado para o desenvolvimento de competências não técnicas, tais como liderança, tomada de decisão, comunicação, avaliação situacional e trabalho de equipa, competências fundamentais para as funções futuras que irão desempenhar a bordo das unidades navais como Oficial de Quarto à Ponte. De modo a compararmos a comunicação, liderança, avaliação situacional, trabalho de equipa e tomada de decisão por ano escolar (2º, 3º, 4º e 5º) e por classe (Marinha, Administração Naval, Engenharia Mecânica e Engenharia de Armas e Eletrónica), optou-se por aplicar testes não paramétricos, dado que as variáveis em estudo não apresentavam uma distribuição normal, de acordo com os resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov. Assim, aplicou-se o teste de Kruskal-Wallis para amostras independentes. Tornou-se ainda necessário perceber entre que anos e classes é que existiam diferenças; deste modo, efetuaram-se vários testes de comparações múltiplas, com recurso ao teste não-paramétrico de Mann-Whitney.

Por último, aplicou-se um segundo questionário, desta vez aos docentes/instrutores que utilizam ou utilizaram, tanto o SIMNAV como o simulador de navegação do CITAN, em sessões práticas de treino/ensino das funções de OQP, perfazendo um total de 10 oficiais. Importa destacar que não foram aplicados quaisquer testes a estes questionários por a amostra representar praticamente todo o universo, pois trata-se de um universo muito reduzido.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Da análise aos questionários dos alunos, obteve-se um total de 16 tabelas com os resultados dos testes aplicados. Torna-se evidente que a satisfação dos alunos da Escola Naval, relativamente à utilização do SIMNAV para o desenvolvimento das suas competências como futuro OQP, aumenta gradualmente com os anos de Escola Naval.

Dos vários projetos que têm sido desenvolvidos neste domínio, as competências não técnicas consideradas fundamentais para as indústrias de alto risco variam consideravelmente de autor para autor; por exemplo, Max Long (2011) destaca a liderança, comunicação, avaliação situacional e tomada de decisão. Após uma revisão da literatura existente, considerou-se que, ao nível da Marinha Portuguesa, as competências não técnicas fundamentais para as funções de OQP passam pela liderança, comunicação, tomada de decisão, trabalho de equipa e avaliação situacional. No que diz respeito à liderança, constatou-se que os alunos do 2º ano são os que menos acreditam na capacidade do simulador para desenvolvimento desta competência, sendo que os alunos do 5º ano são os que mais recomendam o ambiente simulado para o desenvolvimento de liderança. Este facto poderá estar associado com o aumento gradual do tempo que os alunos passam no simulador, de ano para ano, e incremento do conhecimento que estes vão adquirindo nas diferentes unidades curriculares.

Quanto à comunicação e à forma como esta é avaliada e/ou desenvolvida nos simuladores da MP, a opinião dos alunos obedece ao mesmo padrão que a liderança. Os alunos do 2º ano, quando questionados acerca da insistência dos formadores no uso de linguagem formal entre os membros da equipa de Quarto à Ponte no simulador de navegação, avaliaram essa insistência como sendo realizada com menor frequência do que o fizeram os alunos dos restantes anos. O mesmo se aplica quanto à avaliação do procedimento radiotelefónico, sendo que os alunos do 2º ano consideram que a avaliação do procedimento radiotelefónico utilizado pela equipa de Quarto à Ponte no simulador é realizada com menor frequência. Também se encontraram diferenças de opinião entre os alunos do 3º ano e os do 4º e 5º anos, sendo que os primeiros sentem que essa avaliação é feita com menor frequência.

Quanto à avaliação situacional, os alunos do 2º ano apresentaram valores significativamente mais baixos do que os alunos do 3º e do que os alunos do 4º ano. Ou seja, os alunos do 2º ano sentem que os formadores incentivam com menor frequência a monitorização da execução da tarefa, mantendo a avaliação de situação/envolvente clara para toda a equipa da ponte, em comparação com os alunos do 3º e do 4º ano. Para além disso, os alunos do 2º ano consideraram menos frequente a avaliação por parte dos formadores da capacidade de avaliação de situação dos formandos, quando comparados com os alunos dos restantes anos.

Abordando os processos de tomada de decisão, verificou-se que os alunos do 2º ano sentem que o incentivo para tomar decisões em situações aparentemente desconfortáveis e de risco é menos frequente do que é a opinião dos alunos do 4º ano ou do 5º ano. Também se verificou que os alunos do 4º ano sentem este incentivo com mais frequência do que os alunos do 3º ano e do que os alunos do 5º ano.

No que diz respeito ao trabalho de equipa, e à forma como esta competência não técnica é desenvolvida no simulador, ficou claro que os alunos do 2º ano, ao contrário dos restantes alunos da Escola Naval, sentem que o planeamento das sessões de navegação no simulador, em grupo, é feito com menor frequência. No entanto, 77% dos alunos da Escola Naval consideram que o trabalho de equipa é sempre ou frequentemente promovido pelos formadores, no simulador.

Existe aqui uma clara tendência para os alunos do 2º ano terem uma opinião menos boa no que diz respeito à avaliação e desenvolvimento das

competências não técnicas no SIMNAV; este facto pode dever-se à pouca experiência e tempo que utilizam o simulador.

Cerca de ¾ dos alunos (102 alunos) considerou as sessões de formação no simulador de navegação como muito importantes para o desenvolvimento das competências técnicas e mais de metade (79 alunos) considerou essas sessões como muito importantes para o desenvolvimento das competências não técnicas.
Pediu-se aos alunos que colocassem por ordem de relevância os tipos de sessão mais adequadas ao desenvolvimento de competências técnicas e não técnicas. O jogo do cenário, sem interrupção e sem presença do formador no cubículo, foi considerado o menos relevante, já que para 62% dos alunos foi escolhido em 4ª ordem de relevância. O jogo do cenário, com interrupções para esclarecimentos e explicações do formador presente no cubículo, apresentou uma relevância de 1ª ordem para a maioria (38%) dos alunos, resultado este que coincide com a opinião da maioria dos formadores (40%).

Quanto ao questionário dos formadores, as opiniões são muito similares, independentemente de qual o simulador em que tenho exercido funções de formação.

No geral, os inquiridos acreditam que os simuladores são uma mais-valia no desenvolvimento de competências técnicas e não técnicas, que devem ser aproveitados e explorados, e que existe ainda um grande caminho a percorrer e a desenvolver no que diz respeito a maximizar os seus recursos e capacidades. Destes questionários, torna-se ainda percetível a falta de formadores presentes aquando da realização de sessões de formação nos simuladores. Por norma está presente apenas um formador por sessão, para vários cubículos a funcionar em simultâneo, tornando-se assim impossível o acompanhamento adequado aos formandos e a realização de sessões que, na opinião dos formandos e formadores, seriam as mais adequadas. Este facto ficou ainda claro durante as observações das sessões no SIMNAV, onde existia um formador para 4 cubículos a funcionar em simultâneo.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo revela que a utilização dos simuladores de navegação na MP são ferramentas muito úteis aos olhos dos formandos e formadores, às quais cada vez mais se tem vindo a dar importância, procurando-se maximizar a sua exploração e os proveitos que podem trazer a curto/médio/longo prazo. As competências técnicas são claramente uma matéria que necessita de desenvolvimentos, dada a sua importância em organizações que envolvem alto risco aos seus intervenientes. São poucas as sessões diretamente vocacionadas ao desenvolvimento de competências não técnicas, como comunicação, liderança, trabalho de equipa, avaliação situacional ou tomada de decisão. Apesar dos resultados demostrarem uma preocupação com o desenvolvimento destas competências, mesmo não sendo esse o principal propósito das sessões, é evidente que o treino deste tipo de competências carece de uma maior atenção nos primeiros anos da formação dos alunos da Escola Naval, pois constituem competências transversais fundamentais para o exercício das funções de OQPs.

Finalmente, é fundamental implementar uma maior objetividade do treino vocacionado para as competências não técnicas, pois só assim se poderão desenvolver indicadores que possam suportar a avaliação destes parâmetros.

Agradecimentos

Ao CMG Custódio Lopes pelo contributo e apoio na realização deste trabalho de investigação.

À Escola Naval e ao Centro Integrado de Treino e Avaliação Naval (CITAN) pelo apoio a condução dos inquéritos aos alunos e formadores.

REFERÊNCIAS

Barnett, M., Gatfield, D. e Pekcan, C. (2003). A research agenda in maritime crew resource management. *Proceedings of the International Conference on Team Resource Management in the 21st Century, 2003*.

Deboo, K. (2013). Maritime Resource Management (Based on the world renewed SAS-BRM Course). [s.l].

EMA. (2012). *INA 3: Organização do navio para a navegação*. Lisboa. Marinha, Estado Maior.

Flin, R., O'Connor, P., e Crichton, M. (2008). *Safety at the sharp end*. Aldershot, ASHGATE.

Long, M., O'Connor, P. (2011). *Development of the Nontechnical Skills for Officer of the Deck (NTSOD) Rating Form*, Tese apresentada na Naval Postgraduate School, U.S. Navy. Monterey, California.

Devitt, K., Holford, S. (2010). The development of resource management and leadership behavioural markers for the Merchant Navy. In: *Maritime Human Resources Solutions Conference*, 28th – 30th September 2010, St John's, Newfoundland, Canada.

Grech, M. R., Horberry, T. J., e Koester, T. (2008). *Human Factors in the Maritime Domain*. London: CRC Press.

Análise da manobra de recolha de homem ao mar com *Functional Resonance Analysis Method*

H. Bravo (1) e V. Conceição (2)

(1) Base Naval de Lisboa, – Alfeite 2810-001 Almada, almeirim.bravo@marinha.pt

(2) Escola Naval, Base Naval de Lisboa – Alfeite 2810-001 Almada

Resumo: Os padrões de prontidão naval estabelecem termos de referência dos requisitos necessários para a execução das tarefas atribuídas a um navio, os quais são definidos na assunção de um nível de risco considerado aceitável. Muitas das tarefas realizadas pelos navios podem ser consideradas como funções de sistemas sócio tecnológicos complexos, onde a identificação e caracterização dos vários elementos, bem como das suas inter-relações lineares e não lineares, constitui um processo fundamental para a perceção dos riscos envolvidos. O *Functional Resonance Analysis Method* (FRAM) providencia uma metodologia para sistematizar as relações das componentes das funções presentes num sistema complexo. Este artigo apresenta os princípios do FRAM, explorando a sua aplicação numa tarefa específica – a recolha de um homem ao mar, através da conceção de um modelo que permite determinar as vulnerabilidades das componentes e a forma como as mesmas condicionam o objetivo final. Esta informação possibilita o estabelecimento de medidas para uma maior resiliência da tarefa, bem como a sistematização de indicadores que permitam prever o seu estado de prontidão.

Palavras-chave: Análise de risco, FRAM, manobra de recolha de homem ao mar, modelação, resiliência.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo principal deste trabalho prende-se com o estudo e aplicação de uma metodologia já existente de avaliação e gestão de risco, na área da navegação, através da análise da manobra de recolha de homem ao mar.

O navio, enquanto sistema sócio tecnológico complexo (Grech *et al.*, 2008), apresenta-se como o domínio principal deste estudo. A interação entre o indivíduo e a tecnologia constitui a base de um sistema sócio tecnológico, isto porque grande parte das tarefas realizadas a bordo envolvem a execução de tarefas com recurso aos mais variados equipamentos tecnológicos, por parte dos operadores, os quais têm que funcionar como um todo. A partir dos anos 90, com o aumento exponencial da utilização dos computadores, equipamentos de comunicações e de navegação, esta interação tem-se acentuado cada vez mais. A otimização da tecnologia, de modo a corresponder às capacidades e limitações dos seus operadores, bem como a sua introdução num navio enquanto sistema, constitui um importante desafio a ser considerado (Grech *et al.*, 2008).

Segundo David Squire, do *Nautical Institute* (NI), verifica-se uma necessidade clara de sistemas de gestão integrada, nomeadamente de gestão de risco, que auxiliem as pessoas nos diversos domínios de trabalho, cada vez mais complexos, com os quais se deparam (Squire, 2015).

Apesar de todo o esforço em perceber a origem dos acidentes, as organizações continuam a menosprezar a segurança, em prol do lucro, tomando-a como um mal necessário que necessita de ser superado face às limitações verificadas ao nível dos recursos e do conhecimento. A gestão dos riscos e da segurança, em ambientes sócio tecnológicos complexos, requer uma adequada metodologia sistémica (Anand, 2015).

Surge então a formulação dos seguintes problemas: como gerir os riscos de operação do navio e como minimizá-los?

Várias foram as teorias e abordagens utilizadas na modelação de domínios de trabalho. Vicente apresentou a teoria do *Cognitive Work Analysis* (CWA) (Vicente, 1999), a qual fora aplicada na modelação do Comando e Controlo da Classe de Fragatas Canadianas HALIFAX (Burns, 2000). *System Theoretic Accident Model and Processes* (STAMP) constitui outra teoria, apresentada por Nancy Leveson (Leveson, 2004), tendo sido aplicada na análise de um acidente relativo à contaminação bacteriana de um sistema municipal de fornecimento de água (Leveson *et al.*, 2000). Contudo é sobre a utilização do *Functional Resonance Analysis Method* (FRAM), enquanto modelo sistémico não linear, apresentado por Erik Hollnagel, aplicado no domínio dos serviços de saúde (Hollnagel, 2014) e ainda abordada por Nippin Anand (Anand, 2015) na área da navegação, que este estudo toma ênfase.

1.1. FRAM

O FRAM, enquanto método é encarado como uma ferramenta de análise que reflete o propósito da Engenharia de Resiliência, sendo tomado como uma nova forma de encarar os riscos, consistindo em

quatro princípios básicos (Halseth, 2012; Hollnagel, 2014):

1. Princípio da equivalência, na medida em que diferentes consequências não têm que ter obrigatoriamente uma causa diferente, podendo a mesma explicação ser usada na maioria dos casos.

2. Princípio dos ajustamentos aproximados, na medida em que as pessoas ajustam sucessivamente as suas ações, de modo a corresponder às condições e aos recursos de que dispõem.

3. Princípio das consequências emergentes, refletindo o reconhecimento de que nem todos os resultados podem ser explicados de acordo com uma causa específica e identificável, aparecendo por vezes de forma inesperada.

4. Princípio da ressonância funcional, sendo utilizado para descrever e explicar interações não lineares, inerentes ao próprio sistema, podendo a variabilidade de um certo número de funções, reforçar-se mutuamente num determinado momento e repercutir-se noutras funções localizadas a jusante.

Importa ainda clarificar o conceito de sistema resiliente, isto é, um sistema com a capacidade de ajustar o seu funcionamento, antes, durante ou até mesmo após a ocorrência de determinados acontecimentos, sejam eles alterações, oportunidades ou distúrbios, e ainda assim sustentar as operações requeridas, tanto sobre condições previsíveis como inesperadas (Hollnagel, 2014).

Nos últimos anos o método FRAM, tem vindo a ganhar popularidade, particularmente em indústrias de alto risco, de que são exemplo as indústrias petrolíferas, as centrais nucleares e os serviços de saúde, sendo bastante vasta e genérica a sua aplicação prática, incluindo aspetos como a gestão diária de operações, gestão de mudanças, *design* de sistemas, gestão da segurança, avaliação de risco e monotorização do desempenho de sistemas (Anand, 2015).

Neste estudo aplicou-se o FRAM à área da navegação, especificamente na manobra de recolha de homem ao mar, sendo esta uma atividade interna transversal a todos os navios, que envolve a manobra do navio, equipas de trabalho, operação de equipamentos e inúmeras ações a serem tomadas.

A situação de homem ao mar constitui-se como uma das mais stressantes da navegação, sendo necessária uma tripulação treinada e preparada para dar a melhor resposta possível, onde o parâmetro tempo se apresenta como crucial, na recolha do náufrago com vida. Encontram-se disponíveis inúmeros sistemas de salvamento marítimo destinados a salvar vidas humanas e a prevenir este tipo de situações perigosas e emergentes, contudo cabe ao comando do navio deter a perícia e o conhecimento para avaliar a situação e decidir quais as ações prioritárias a executar.

2. METODOLOGIA

O estudo efetuado iniciou-se com a recolha de dados e informação, a bordo dos navios, onde foi possível a observação e registo *in vivo* da operação da manobra de recolha de homem ao mar; realizaram-se entrevistas aos diferentes intervenientes da manobra (enquanto operadores especializados), bem como aos avaliadores do processo (a desempenhar funções no CITAN – Centro Integrado de Treino e Avaliação Naval); recolheram-se e analisaram-se relatórios de avaliação e relatórios de acidentes; analisaram-se procedimentos internos, listas de verificação e doutrina.

Após a recolha dos dados, sintetizou-se toda a informação relevante, referente à manobra em apreço, através de uma tabela contendo quatro colunas, identificando a ação a desenvolver e o seu executor, seguidos de uma descrição da atividade e dos requisitos a si associados, culminando com a identificação dos seus eventuais riscos e falhas.

Posto isto, passou-se à aplicação do método FRAM, o qual se caracteriza pela descrição de sistemas sócio tecnológicos através de funções, obtendo um carácter dinâmico por meio de uma modelação das dependências não-lineares e da variabilidade, inerentes ao próprio sistema de funções obtido.

De modo a descrever a variabilidade funcional, a ressonância e a determinar formas de atenuar o aparecimento de resultados indesejados, a análise FRAM compreende quatro etapas distintas (Woltjer, 2008):

Etapa 1. Identificação das funções essenciais do sistema e sua caracterização através dos seguintes seis parâmetros:

- Entrada (I) - refere-se a tudo o que inicia, usa ou transforma a função.
- Saída (O) - diz respeito a tudo aquilo que a função produz.
- Pré-requisito (P) - pressupõe as condições que devem estar reunidas de modo a que a função possa ser executada.
- Recurso (R) - representa tudo o que a função necessita ou consome.
- Controlo (C) - relaciona-se com o modo como a função é orientada, desempenhada e dirigida, podendo constituir uma instrução ou procedimento.
- Tempo (T) - representa o tempo disponível, bem como os fatores que o podem comprometer.

Todos estes parâmetros acima referidos são descritos segundo uma tabela e subsequentemente visualizados através da representação hexagonal da figura 1.

Etapa 2. Caracterização da variabilidade potencial de cada uma das funções identificadas. Esta etapa

pressupõe a classificação da tipologia de cada função, como indefinida, tecnológica, humana ou organizacional. Por sua vez, caracteriza-se a variabilidade do resultado de cada função, face ao tempo e face à precisão com que a mesma atividade é desempenhada.

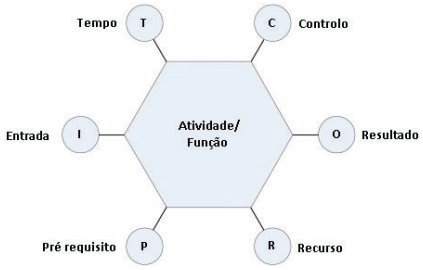


Fig. 1. Função FRAM e respetivos seis parâmetros (Woltjer & Hollnagel, 2008).

Etapa 3. Definição da ressonância funcional, baseada nas possíveis dependências e ligações existentes entre as funções, através dos seus parâmetros, isto é, a entrada de uma função pode derivar do resultado de uma outra função, por exemplo.

Etapa 4. Identificação de barreiras e de contramedidas face à variabilidade, com vista a sua atenuação, bem como a especificação de requisitos e indicadores de monitorização de desempenho (Hollnagel, 2012).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram identificadas 21 funções essenciais ao sistema em foco, tendo as mesmas constituído entrada no modelo FRAM, resultando numa modelação de funções, baseada na recolha de dados previamente efetuada. Cada uma das funções foi caraterizada, segundo os seis parâmetros mencionados acima na metodologia. A tabela 1 sistematiza a função *Dar o Alarme*.

Tabela I. Identificação dos parâmetros de uma função, exemplo da função Dar o Alarme.

Dar o Alarme	Descrição
Entradas	Visualização e identificação do homem na água; Visualização do homem na água ainda não identificado; Visualização perdida do náufrago; Decisão de falta efetiva de um elemento a bordo.
Saídas	Alarme "Homem ao Mar".
Pré-requisitos	Equipamentos de comunicações a funcionar corretamente.
Recursos	Botoneiras distribuídas pelo exterior do navio; Vigias.
Controlo	Certificação de funções de vigia, rondas e embarque; Existência de procedimentos internos, *checklists*, Instruções permanentes; Processos de certificação de operadores.
Tempo	-

A função *Dar o Alarme*, acima sumarizada, é da responsabilidade de qualquer elemento da guarnição, tendo como destinatário principal o elemento da ponte que se encontra responsável pela condução da manobra, relacionando-se com as funções *Visualizar homem na água* e *Considerar falta de um elemento a bordo*, através de ligações funcionais, cujas saídas constituem entradas da função focada na tabela I, encontrando-se bem patente uma relação de dependência das mesmas. A tipologia desta função pode ser classificada como humana, onde a sua variabilidade face ao tempo toma um carácter habitual e uma precisão comummente aceitável.

Esta sumarização fora efetuada para todas as funções que constituem o modelo FRAM, obtendo-se um modelo de visualização, que permite a perceção do modo como os fatores de risco contribuem e se propagam, bem como das relações funcionais existentes entre os seus diferentes contributos, tal como ilustrado na figura 2.

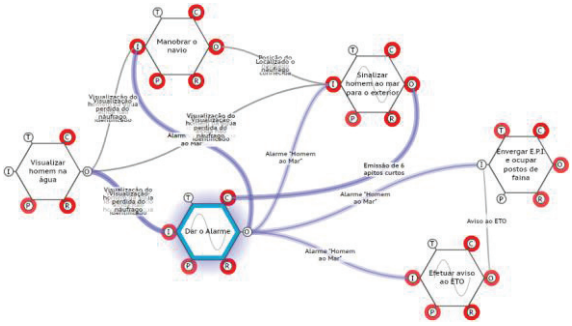


Fig. 2. Parte do Modelo FRAM referente à manobra de recolha de homem ao mar com foco para função Dar o Alarme.

A modelação efetuada deste processo permitiu identificar inúmeras vantagens. Permitiu a identificação de vulnerabilidades inerentes à manobra, na medida em que se encontra bem notório o impacto que terá uma eventual quebra de ligação funcional. A obtenção de uma perceção do encadeamento e das ligações funcionais, associadas às diferentes ações a serem realizadas, constitui-se como uma mais-valia apresentada. O modelo representado, ao possibilitar a classificação da tipologia das diferentes ações, bem como da sua variabilidade, fornece uma perceção da forma como aquelas que possuem maior variabilidade e por sua vez maior risco, poderão condicionar o objetivo final da tarefa, neste caso o *Arriar da embarcação*, visando a recolha do náufrago com vida.

Para além das vantagens já enumeradas, esta metodologia permite melhorar o desempenho das diferentes ações a serem desenvolvidas, sendo possível analisar cada uma das suas ligações funcionais e formular barreiras e novas medidas de controlo, conduzindo a um reforço e a um consequente aumento da sua eficiência. Como por exemplo, a função *Visualizar homem na água*, pode ser reforçada, se os elementos que pretendessem circular no exterior do navio o fizessem sempre acompanhados. Outra alternativa poderia passar pela introdução de um novo mecanismo de controlo no próprio homem que cai ao mar. Como por exemplo um automatismo presente no fato do homem que despoletasse um alarme a bordo após ação do disparador hidrostático, do colete salva-vidas.

O ponto de partida inicial deste estudo prendeu-se com a modelação da gestão do navio, com vista a minimização do risco de ocorrência de acidentes. Sendo o navio um sistema sócio tecnológico complexo e grande parte da sua gestão suportada por sistemas de apoio à decisão e de informação, há neste modelo de visualização, a possibilidade de se integrarem indicadores automáticos, que poderiam alimentar os diferentes parâmetros das suas funções.

Este estudo ilustra a aplicação do FRAM como um método de análise prospetiva e de avaliação de risco, evidenciando a sua diferença face aos comuns e tradicionais fluxogramas resultantes da descrição sequencial de tarefas. Ao invés disso, este método de caráter qualitativo, descreve dependências funcionais não lineares.

4. CONCLUSÕES

Este estudo demonstra a possibilidade de aplicação de uma abordagem alternativa de análise de risco, designada por FRAM, na área da navegação, baseada nos princípios da engenharia de resiliência. Enquanto outras abordagens se focam nos riscos resultantes de falhas ou de mau funcionamento por parte dos equipamentos, a engenharia de resiliência foca-se nas funções e processos que estão na origem tanto do sucesso como do insucesso, demonstrando que a avaliação da segurança se deve focar no modo como as funções são levadas a cabo, ao invés de perceber como as mesmas podem falhar.

A conceção deste tipo de modelos, permite ao utilizador, dispor de um modelo mental de todos os processos e constrangimentos inerentes a determinada tarefa, bem como dos fatores que promovem acidentes, viabilizando potenciais métodos para a sua prevenção, aprendendo com os incidentes passados. Este tipo de modelo dinâmico culmina num sistema de apoio à decisão com um melhor desempenho na avaliação dos padrões de segurança (padrões de prontidão) de uma unidade naval.

Trabalhos futuros passarão pela validação do modelo em cenários reais, bem como pela integração de indicadores automáticos nos parâmetros identificados nas funções. Os resultados destes trabalhos poderão seguramente contribuir para dissipar a limitação resultante da menor dimensão quantitativa do modelo.

Agradecimentos

Ao CTEN M Afonso Martins, Oficial da Marinha Portuguesa especializado em navegação e avaliador no Departamento de Treino e Avaliação (DTA), inserido no Centro Integrado de Treino e Avaliação Naval (CITAN), por todo o apoio, disponibilidade, atenção, partilha de conhecimentos e vasta experiência.

À Equipa de Avaliação do CITAN (EACITAN), pela oportunidade de acompanhamento e observação de um processo de Avaliação de Padrões de Prontidão, ao qual o NRP Cacine fora submetido, permitindo a aquisição de dados *in vivo*.

REFERÊNCIAS

Anand, Nippin (2015), "A methodological approach to the management of risk and safety", *Alert!*. Issue No. 39, p. 7.

Burns, Catherine M., Bryant, David J. e Chalmers, Bruce A. (2000), *A Work Domain Model to Support Shipboard Command and Control*, Canada, Defence Research Establishment, disponível em http://www.dodccrp.org/events/6th _ICCRTS/Tracks/Papers/Track4/026_tr4.pdf.

Grech, Michelle Rita, Horberry, Tim John, Koester, Thomas (2008), *Human Factors in the Maritime Domain*, New York, CRC Press, Taylor & Francis Group.

Halseth, Inger Krohn (2012), *Modeling process leaks using FRAM*, Master of science in product design and manufacturing, Norway, Norwegian University of Science and Technology.

Hollnagel, Erik (2002), *FRAM: The Functional Resonance Analysis Method - Modelling Complex Socio-Technical Systems*, England, Ashgate Publishing Limited.

Hollnagel, Erik (2012), *An Application of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to Risk Assessment of Organisational Change*, Swedish Radiation Safety Authority, disponível em http://www.iaea.org/inis/collection/NCL CollectionStore/_Public/44/057/44057156.pdf.

Hollnagel, Erik, Hounsgaard, J., Colligan, L., (2014), *FRAM – The Functional Resonance Analysis Method – a handbook for the practical use of the method*, Dinamarca, Centre for Quality, disponível em http:// functionalresonance.com/onewebmedia/FRAM_ handbook_web-2.pdf.

Leveson, Nancy (2004), *A New Accident Model for Engineering Safer Systems*, USA, Massachusetts Institute of Technology, disponível em http://sunnyday.mit.edu/accidents/ safetyscience-single.pdf.

Leveson, Nancy *et al.* (2000), *Applying STAMP in Accident Analysis*, USA, Massachusetts Institute of Technology, disponível em http://shemesh.larc.nasa.gov/iria03/p13-leveson. pdf.

Squire, David (2015), "Introduction", *Alert!*. Issue No. 39, p. 2.

Vicente, Kim J. (1999), *Cognitive Work Analysis Toward Safe, Productive, and Healthy Computer-Based Work*, Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Woltjer, Rogier, Hollnagel, Erik (2008), Functional modeling for risk assessment of automation in a changing air traffic management environment. *4th International Conference Working on Safety* Crete, Greece.

O Farol como Centro de Serviços Marítimos

C. Ventura Soares (1)

(1) Autoridade Marítima Nacional, Direção de Faróis, Estrada Margina1, 2770-210, Paço de Arcos
ventura.soares@marinha.pt

Resumo: Um farol não deve ser considerado apenas para finalidades de assinalamento marítimo mas entendido como uma infraestrutura que pode funcionar como um centro de serviços marítimos. A implementação de um sistema de centros de serviços marítimos baseado na rede de faróis existente na costa Portuguesa beneficiará da sua extensa cobertura nacional e da excelência dos locais onde se posiciona.
Como grandes segmentos de um centro de serviços marítimos apontam-se o assinalamento e posicionamento marítimo, a segurança da navegação, a monitorização e controlo do tráfego marítimo, a vigilância costeira, a monitorização do ambiente costeiro, a cultura marítima e o turismo marítimo.
Nesta comunicação pretende-se demonstrar a racionalidade da colocação em prática deste conceito em território nacional, discriminando a natureza dos produtos resultantes e as entidades potencialmente beneficiárias.

Palavras-chave: Farol, serviços marítimos, segurança da navegação.

1. INTRODUÇÃO

Um farol é por definição uma torre provida de foco luminoso, em local apropriado da costa marítima, que serve de guia à navegação[1]. É portanto um garante da segurança da navegação, especialmente da costeira. Mesmo em sentido figurado farol é sinónimo de segurança. A palavra Farol deriva da palavra grega Faros, nome da ilha onde foi construído o primeiro farol de que há referências históricas (280 a.C.): o Farol de Alexandria, considerado uma das sete maravilhas da Antiguidade e a única efetivamente construída com fins utilitários.

Sendo discutível eleger qual foi o primeiro farol da costa Portuguesa reconhece-se o farol de Nossa Senhora da Luz, na foz do Douro, como o primeiro construído especificamente para o efeito (1761) no âmbito do alvará pombalino de 1758, que promoveu, de uma forma sistemática, a construção de faróis em Portugal. Só muito mais tarde é que surge o primeiro projeto geral de farolagem (1866) da autoria do engenheiro hidrógrafo Francisco Pereira da Silva. Os primeiros faróis construídos nos arquipélagos atlânticos portugueses foram o da Ponta de S. Lourenço na Madeira (1870), o da Ponta do Arnel em S. Miguel nos Açores (1876) e também o de Dona Maria Pia (Ilha de Santiago) em Cabo Verde (1881).

Durante cerca de 200 anos (até 1959) foi construído um conjunto importante de faróis na costa Portuguesa, que ainda hoje permanecem a funcionar, quase na sua íntegra, em apoio à navegação costeira. A tecnologia de alumiamento evoluiu e os candeeiros a petróleo foram substituídos por modernos sistemas LED, embora convivendo com as clássicas óticas lenticulares de Fresnel.

2. O FAROL (AINDA E SEMPRE) COMO AJUDA À NAVEGAÇÃO

Faz ainda sentido existirem faróis como ajudas à navegação numa época em que qualquer GPS de bolso/*smartphone* fornece a nossa posição georreferenciada? Coloque-se a pergunta ao navegador de recreio, ou ao pescador. Pergunte-se se o "conforto" de terem um farol no seu horizonte visual se traduz ou não por mais segurança nas navegações costeiras ou nas aproximações a portos que efetuam. A resposta não deixará de ser unânime, pela positiva. Mesmo os comandantes e os oficiais de quarto dos navios SOLAS[2] não prescindem da redundância que os faróis constituem no seu posicionamento em navegação costeira e no assinalamento dos perigos, não confiando exclusivamente no GPS e nos sistemas eletrónicos associados. Para além disso, em navegação em águas restritas os meios eletrónicos não substituem os meios visuais.

Como as tecnologias evoluem os faróis constituem também, desde há alguns anos, não apenas fonte de orientação e posicionamento visual como também locais de excelência para instalação de sistemas de posicionamento eletrónicos. Assim, os faróis podem alojar sistemas AIS (*Automatic Identification System*), importantes ajudas para o navegador nas aproximações aos portos ou em zonas com esquemas de separação de tráfego (funcionando como estações

[1] Definição da Infopédia, Dicionários Porto Editora.

[2] Navios que obedecem à Convenção SOLAS - *International Convention for the Safety of Life at Sea*.

AIS ou gerando AIS virtuais). Os terrenos adjacentes aos faróis são também muitas vezes usados para instalação de outros equipamentos de apoio ao posicionamento da navegação, caso das estações de GPS diferencial (DGPS) na costa continental portuguesa.

3. O FAROL COMO CENTRO DE SERVIÇOS MARÍTIMOS

A bem da racionalização de recursos os faróis não devem ser considerados apenas para finalidades de assinalamento e posicionamento marítimo. Os faróis, entendidos como as infraestruturas e os terrenos adjacentes que circundam as torres de alumiamento, devem ser vistos de uma forma integrada como centros de serviços marítimos, beneficiando da extensa cobertura nacional da sua rede e da excelência dos locais onde se posicionam (Soares, 2015). Sete grandes segmentos constituem estes centros de serviços:

- O assinalamento e posicionamento marítimo (a função original) (Fig. 1)
- A segurança da navegação
- A monitorização e controlo do tráfego marítimo
- A vigilância costeira
- A monitorização do ambiente costeiro
- A cultura marítima
- O turismo marítimo

O segmento "assinalamento e posicionamento marítimo" já foi analisado no ponto anterior.

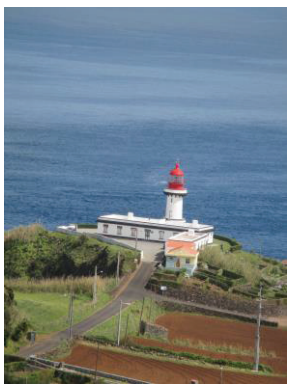


Fig. 1. Farol "clássico" na Ponta do Topo (Ilha de São Jorge).

O segmento "segurança da navegação" remete para a instalação de equipamentos que possam auxiliar a autoridade marítima local no âmbito das suas competências em matéria de segurança da navegação, incluindo o suporte de ações de busca e salvamento e ações de combate à poluição (Fig. 2). O sistema COSTA SEGURA, da Autoridade Marítima Nacional (AMN), desenvolvido nessa perspetiva, prevê a utilização das infraestruturas dos faróis para a instalação de radares, antenas AIS e equipamentos óticos de visualização[3].



Fig. 2. Farol de Eierland na Holanda com radar instalado.

O segmento "monitorização e controlo do tráfego marítimo" está associado a uma competência do Estado Costeiro. O atual sistema de VTS (*Vessel Traffic Service*) costeiro, operado pela Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos (DGRM) do Ministério do Mar, tem um centro de controlo costeiro nas instalações do farol da Ponta do Altar (Ferragudo) no Algarve (Fig. 3).



Fig. 3. Farol da Ponta do Altar com torre VTS associada.

O segmento "vigilância costeira" tem a ver com a deteção da atividade ilegal (como seja a pesca não autorizada, o contrabando, a imigração ilegal, a pirataria ou o terrorismo). O Sistema Integrado de Vigilância, Comando e Controlo (SIVICC) concebido para o efeito e operado pela Guarda Nacional Republicana (GNR) tem instaladas antenas de radar nos perímetros dos faróis da Ponta da Piedade (Lagos) (Fig. 4) e Cabo da Roca.

[3] À semelhança dos "sémaphores" instalados na costa francesa e geridos pela Marinha Francesa.



Fig. 4. Farol da Ponta da Piedade com torre SIVICC associada.

O segmento "monitorização do ambiente costeiro" permite, por exemplo, a instalação de estações meteorológicas automáticas (Fig. 5), câmaras vídeo para observação sistemática das zonas litorais, para efeitos de estudos das suas dinâmicas, ou antenas de radar HF para medição de correntes costeiras. Os faróis de Alfanzina, Ponta de Sagres, Cabo Sardão, Cabo Espichel e S. Julião têm sido utilizados para esta finalidade pelo Instituto Hidrográfico e por universidades e empresas nacionais.



Fig. 5. Farol do Wilson Promontory na Austrália com estação meteorológica instalada.

O segmento "cultura marítima" passa pela dinamização do farol como polo de cultura marítima e científica na sua área de implantação, onde se podem articular a AMN, a Marinha, as entidades do Estado da cultura e da ciência, a Ciência Viva, autarquias, fundações de natureza cultural ou marítima, ou associações de cidadãos "amigos dos faróis". Os faróis de Santa Marta (Fig. 6) e do Regufe são exemplos de utilizações neste âmbito.

Finalmente o segmento "turismo marítimo" potencia possíveis "Rotas de Faróis" (por exemplo com a criação de passaportes a carimbar nos diversos faróis), a exploração de pontos de observação turística ou a utilização da infraestrutura habitacional sobrante, devidamente adaptada, para a sua utilização turística em regime hoteleiro (rede "Faróis de Portugal"?). Ações preliminares já efetuadas permitiram aferir da boa recetividade desta aproximação entre os principais agentes interessados.

Claro que não há soluções únicas para todos os faróis. Há que garantir sempre uma posição flexível e adaptativa, conforme as caraterísticas dos faróis e os interesses dos eventuais parceiros.



Fig. 6. Farol Museu de Santa Marta em Cascais.

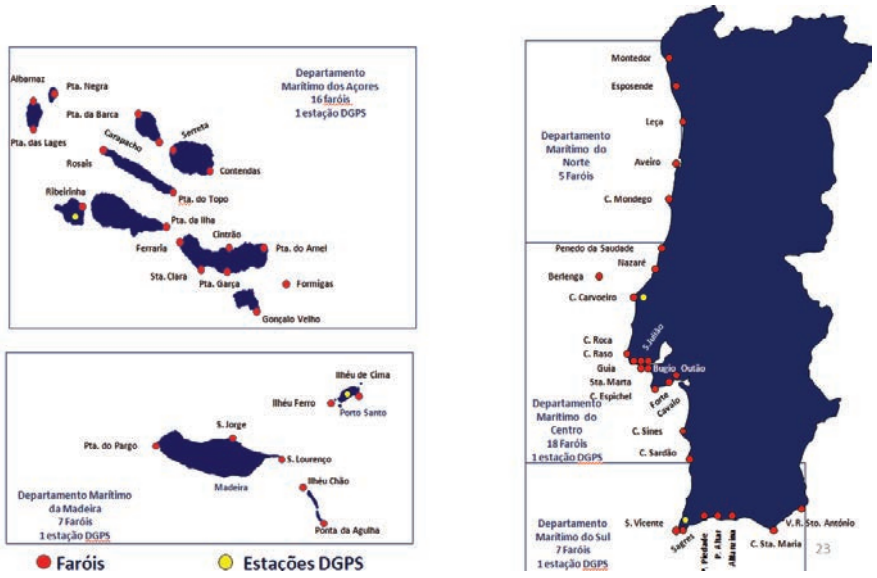


Fig. 7. Rede de Faróis e estações DGPS em Portugal.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os faróis sempre se revelaram fatores de atração para o Homem pois transmitem segurança. Os atuais sistemas de ajudas à navegação continuam a não prescindir dos faróis na sua conceção.

O farol do futuro passa pela sua transformação em centro de serviços marítimos. Este centro pode ter atividade em qualquer um dos segmentos analisados: assinalamento e posicionamento marítimo (a função original), segurança da navegação, monitorização e controlo do tráfego marítimo, vigilância costeira, monitorização do ambiente costeiro, cultura marítima e turismo marítimo.

Em Portugal cabe à Direção de Faróis (DF), integrada na AMN, a operação e manutenção dos faróis costeiros (Fig. 7). Neste contexto a DF tem procurado encontrar soluções que operacionalizem o conceito do centro de serviços marítimos, pois está ciente que assim preservará infraestruturas de inegável utilidade e simbolismo acrescido num País que se pretende voltado para o Mar. Quaisquer que sejam os desenvolvimentos importa manter o foco do farol na segurança da navegação pois, como diz o lema da DF, "Faróis na Costa, Segurança no Mar"!

REFERÊNCIAS

Soares, C. V. (2015). Faróis na Costa, Segurança no Mar!, *Revista de Marinha Nº988, Novembro/Dezembro 2015*, Lisboa, Portugal.

Índice do Estado do Mar nas aproximações aos portos

M. Alves (1), J. P. Pinto (1), S. Almeida (1), P. Mota (1), A. Jorge da Silva (1), L. Lamas (1), R. Deus (2) e N. Almeida (3)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. margarida.alves@hidrografico.pt.

(2) Instituto Português do Mar e da Atmosfera I.P., Rua C do Aeroporto, 1749-077 Lisboa, Portugal.

(3) Deimos Engenharia SA, Av. D. João II, Lote 1.17.01, 10º, Torre Zen, 1998-232 Lisboa, Portugal.

Resumo: A gestão e a vigilância do tráfego marítimo são fundamentais para garantir a segurança nas áreas portuárias. Proporcionar o acesso à informação do estado do mar em tempo real e a resultados de modelos de previsão, é fulcral para apoiar a tomada de decisão em relação às operações portuárias. Atualmente, encontram-se disponíveis previsões para a agitação marítima resultantes de um modelo costeiro de alta resolução na zona de aproximação a vários portos (Viana do Castelo, Póvoa do Varzim, Aveiro e Figueira da Foz), que combinadas com previsões meteorológicas, permitem a criação de um índice que expresse a relação de causa-efeito, que se assume que exista, entre o estado do mar-atmosfera e o correspondente constrangimento nas entradas portuárias. Para estabelecer esta correspondência usou-se a metodologia das redes neuronais, que se tem mostrado bastante eficaz e apropriada na resolução de problemas não-lineares, como, por exemplo, no reconhecimento de padrões e ajuste de funções. Neste artigo são apresentados os resultados da aplicação deste método onde se atesta, para os portos de Aveiro e Figueira da Foz, a capacidade da rede neuronal em prever o estado da barra com base em previsões meteorológicas e de agitação marítima.

Palavras-chave: Previsão, estado das barras, redes neuronais, oceanografia.

1. INTRODUÇÃO

A área marítima da costa Ocidental de Portugal pode caracterizar-se como uma área onde conflui uma quantidade assinalável de navegação, nomeadamente aquela que navega entre o Atlântico Sul e o Norte da Europa. Esta navegação encontra-se geralmente desabrigada e exposta a condições meteorológicas desfavoráveis, pelo que um conhecimento oceanográfico se torna extremamente útil para uma navegação segura (Instituto Hidrográfico, 2015).

No âmbito do projeto SIMOcean (*System for Integrated Monitoring of the Ocean*) têm vindo a desenvolver-se três casos de estudo, focando um deles a criação do Índice do Estado do Mar nas aproximações aos portos, com o objetivo de produzir uma ferramenta integrada para apoio à gestão do tráfico portuário.

As condições de constrangimento para as diferentes barras portuárias são definidas no Roteiro da Costa de Portugal (Instituto Hidrográfico, 2015), cabendo às capitanias a responsabilidade de decidir qual o estado da barra a adotar. Apesar das regras em que se fundamenta este processo de decisão não serem do domínio público, é natural que deva existir uma correspondência entre os estados das barras selecionados e as respetivas condições meteorológicas e de agitação marítima na aproximação portuária. Para obter esta correspondência entre os estados das barras e as condições ambientais, usou-se uma rede neuronal artificial (RNA) com uma camada interna sem realimentação, onde as variáveis ambientais formam os dados de entrada e o índice do Estado do Mar, que expressa o estado da barra, os dados de saída.

Esta metodologia foi implementada e testada para os portos de Aveiro e Figueira da Foz. Para as variáveis ambientais foram utilizados resultados do modelo operacional de alta resolução para domínios costeiros (SMARTWAVE) desenvolvido no Instituto Hidrográfico, combinados com os resultados do modelo regional atmosférico (ALADIN) desenvolvido pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Os correspondentes estado das barras foram adquiridos a partir dos avisos à navegação emitidos pela Autoridade Marítima.

2. METODOLOGIA

Para enquadramento dos dados a utilizar na implementação da rede neuronal apresenta-se de seguida uma breve descrição das diversas fontes:

2.1 Modelo de previsão de agitação marítima

O módulo de agitação marítima do modelo costeiro SMARTWAVE simula previsões a cinco dias com um passo temporal de 3 horas. Nas áreas em estudo, as condições do estado do mar são estimadas com uma resolução espacial de 0.5” (Mota *et al.*, 2014). Os dados de saída deste modelo são:

- Altura significativa, comprimento de onda e direção associada ao período de pico;
- Período de pico;
- Altura da coluna de água.

2.2 Modelo de previsão meteorológica

O modelo regional ALADIN prevê as condições atmosféricas a três dias com um passo temporal de 3 horas. A sua resolução horizontal é de 9 km. Os dados de saída deste modelo consistem nos seguintes parâmetros:

- Temperatura do ar a 2 m;
- Cobertura de nuvens;
- Pressão atmosférica ao nível médio do mar;
- Humidade relativa a 2 m;
- Precipitação;
- Vento zonal e meridional a 10 m;
- Rajada a 10 m.

2.3 Estado das barras

O estado das barras que se utiliza neste estudo, provém dos avisos locais que se podem consultar no portal da Autoridade Marítima Nacional (www.amn.pt).

A informação retirada diariamente desta página indica o constrangimento da barra, nomeadamente se a barra se encontra aberta, fechada ou condicionada. Quando se fala em condicionamento de barra está-se a referir que, por exemplo, a barra da Figueira da Foz está fechada a embarcações de comprimento inferior a 11 m, mas aberta à restante navegação (Instituto Hidrográfico, 2015).

Para o estudo, consideraram-se os Portos de Aveiro e da Figueira da Foz, pois foram os que apresentaram maior variabilidade no estado da barra durante o período de aquisição de dados. Em ambos verificaram-se 4 tipos diferentes de estados, que foram convertidos em números inteiros de modo a incorporarem a rede neuronal (Tabela I e II).

Tabela I. Estados da barra aplicados ao Porto de Aveiro (Instituto Hidrográfico, 2015).

Valor	Designação
1	Barra aberta
2	Barra fechada a embarcações com comprimento inferior a 15 m
3	Barra fechada a embarcações com comprimento inferior a 35 m
4	Barra fechada

Tabela II. Estados da barra aplicados ao Porto da Figueira da Foz (Instituto Hidrográfico, 2015).

Valor	Designação
1	Barra aberta
2	Barra fechada a embarcações com comprimento inferior a 11 m
3	Barra fechada a embarcações com comprimento inferior a 35 m
4	Barra fechada

2.4 Configuração da rede neuronal artificial

Para a aprendizagem e teste da rede neuronal recorreu-se a dados meteo-oceanográficos e correspondentes estado das barras, compreendidos entre 23 de janeiro e 16 de abril de 2016. Os valores a ser utilizados como dados de entrada são determinados ao longo dos azimutes de entrada definidos em cada porto segundo o Roteiro publicado em 2015.

Uma rede neuronal artificial é inspirada no funcionamento do cérebro e pode definir-se como sendo um sistema interconectado de unidades computacionais, designados por neurónio ou nós (Cortez e Neves, 2000), que tenta estabelecer, através de um processo iterativo, uma relação de causalidade ou funcional, entre dois conjuntos de dados, que não é conhecida *a priori*.

A arquitetura da rede, isto é, o número de camadas ocultas, o número de nós por camada, o sentido do fluxo de informação, assim como o tipo de funções de ativação associada aos nós, pode ser diversa e, em larga medida, dependente do problema que se pretende resolver. No caso em estudo optou-se por uma arquitetura simples, com uma camada oculta sem realimentação, pois é reconhecido que, em geral, esta configuração resolve a maioria dos problemas de ajuste funcional (Figura 1). Em testes preliminares foram considerados diferentes tipos de funções de ativação, tendo-se revelado como a melhor opção a função sigmóide (tangente hiperbólica) para os nós da camada oculta e uma função linear para o nó de saída.

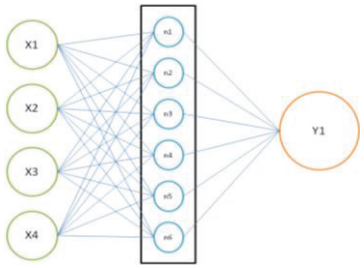


Fig. 1. Arquitectura da RNA.

Em ambos os portos foram testadas duas configurações com diferente número de variáveis de entrada. Para a configuração A considerou-se nove variáveis de entrada, nomeadamente, a altura significativa média e máxima, a altura da coluna de água mínima e média, a declividade média e máxima, a cobertura de nuvens e a direção média do vento na componente zonal e meridional. Os valores mínimos, médios e máximos são calculados com base nos valores simulados ao longo do azimute de entrada. Para a configuração B considerou-se apenas quatro variáveis de entrada, nomeadamente, a altura significativa máxima, a declividade máxima e as componentes médias do vento. Em ambos os casos, usou-se como variável de saída o estado das barras.

Para cada uma das configurações, foram ainda testados dois métodos que diferem na percentagem em que dividem os dados e no esquema de convergência. No primeiro método, 75% dos dados são usados na aprendizagem ("*train*") e os restantes 25% no teste da rede. O número de iterações

associado ao esquema de convergência está definido *a priori*. No segundo método, 60% dos dados são usados na aprendizagem, 20% na validação e os restantes 20% no teste. Neste método a convergência é obtida com base num processo de otimização, onde a iteração selecionada é a que minimiza o desempenho da rede para o conjunto de dados de validação. Este método baseia-se no facto geral de que, apesar do erro relativo ao treino ter tendência a diminuir com o número de iterações, o erro obtido com base nos dados de validação diverge a partir de um determinado número de iterações.

2.5 Caso de estudo

Para determinar o número ótimo de nós em cada configuração, a estratégia utilizada consistiu em treinar a rede para uma sequência crescente de nós da camada oculta (1 a 20 nós), fazendo 40 simulações para cada elemento dessa sequência de modo a determinar a variabilidade associada à divisão dos dados. O coeficiente médio de correlação e o respetivo desvio padrão em função do número de nós é ilustrado nas Figuras 2 – 5 para as diferentes configurações e para os dois portos.

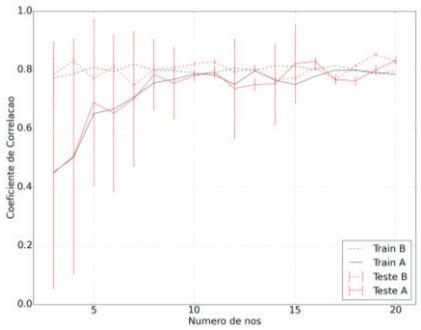


Fig. 2. Processo aplicado para definir o número de nós, baseado no primeiro método de convergência – Figueira da Foz.

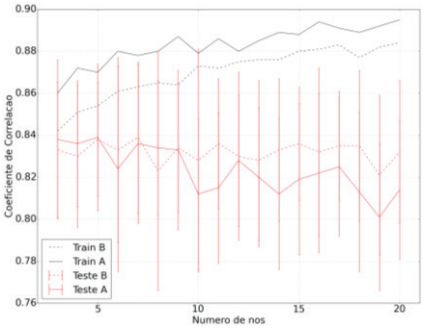


Fig. 3. Processo aplicado para definir o número de nós, baseado no segundo método de convergência – Figueira da Foz.

Após a análise das figuras 2 e 3, o número de nós pode ser definido com base no menor desvio padrão, mas tendo também em consideração o valor de correlação apresentado para o treino. Assim, para o primeiro método de convergência aplicado no Porto da Figueira da Foz, o número de nós utilizado foi 10, enquanto para o segundo foi 9.

Com base na metodologia acima apresentada e analisadas as figuras 4 e 5, o número de nós utilizado para o Porto de Aveiro foi de 8 para o primeiro método e 7 para o segundo.

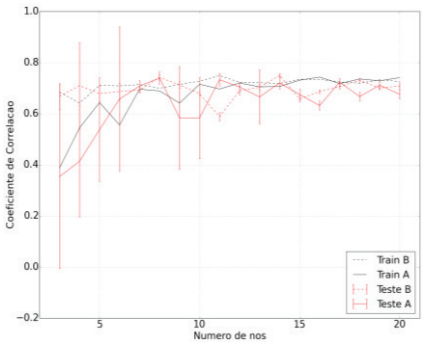


Fig. 4. Processo aplicado para definir o número de nós, baseado no primeiro método de convergência – Aveiro.

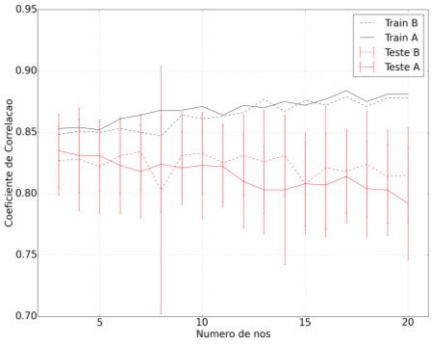


Fig. 5. Processo aplicado para definir o número de nós, baseado no segundo método de convergência – Aveiro.

3. RESULTADOS

Com base nos dados usados para teste, comparou-se o estado da barra simulado pela RNA com o estado da barra promulgado. Os resultados estão ilustrados na forma matricial nas Tabelas III – VI; o elemento $P_{ij}\,(i,j=1,\ldots,4)$ representa o erro percentual associado aos eventos para o qual o estado da barra promulgado é i e o estado da barra simulado pela RNA é j. A soma dos elementos diagonais representa a percentagem de correspondências entre os estados da barra simulados e promulgados. Os elementos acima da diagonal e abaixo da diagonal estão, respectivamente, associados a sobrestimações e subestimações do estado da barra simulado.

3.1 Porto da Figueira da Foz

Os resultados (Tabela III) mostram que 69,28% dos valores simulados corresponderam aos valores promulgados. Saliente-se também a existência de uma sobrestimação grosseira da rede. Enquanto os dados recolhidos dos Avisos Locais indicavam que o porto se encontrava aberto a toda a navegação, a rede simulou que o estado deveria ser de condicionamento a embarcações inferiores a 35 m (1,43%). No entanto, como o número de eventos usados no teste é da ordem da centena, este comportamento é residual. Confrontando os resultados acima da diagonal (12,86%) com os obtidos abaixo desta (17,14%), verifica-se um

pequeno enviesamento no desempenho da RNA com tendência para subestimar o estado da barra.

Tabela III. Percentagens obtidas no Porto da Figueira da Foz aplicando o primeiro método (Configuração B).

Promulgado \ Simulado				
	22,14	10,00	1,43	0,00
	3,57	18,57	1,43	0,00
	0,00	7,14	22,14	0,72
	0,00	0,00	6,43	6,43

Aplicando o segundo método de convergência, confirma-se que para o Porto da Figueira da Foz a percentagem de correspondência de estados foi de 68,18%. Neste método já não se verificou a sobrestimação grosseira, embora a percentagem de correspondência tenha sido inferior ao do primeiro método. Deve reparar-se que existe um maior equilíbrio para as percentagens obtidas entre a parte superior e inferior da diagonal (Tabela IV), e portanto um menor enviesamento.

Tabela IV. Percentagens obtidas no Porto da Figueira da Foz aplicando o segundo método (configuração B).

Promulgado \ Simulado				
	28,18	13,64	0,00	0,00
	3,64	10,91	1,82	0,00
	0,00	10,00	22,73	0,90
	0,00	0,00	1,82	6,36

3.2 Porto de Aveiro

Tabela V. Percentagens obtidas no Porto de Aveiro aplicando o primeiro método (configuração B).

Promulgado \ Simulado				
	40,97	16,67	0,00	0,00
	6,25	20,83	0,69	0,00
	0,00	7,64	4,17	0,00
	0,00	1,39	1,39	0,00

Na barra de Aveiro, utilizando o primeiro método existiu uma concordância de 65,97% entre os estados da barra promulgados e estimados (Tabela V). Ao somar os valores apresentados na parte superior e inferior da diagonal (17,36% e 16,67%, respetivamente), verifica-se, mais uma vez, uma equilibro de percentagens, que indica um enviesamento reduzido.

Tabela VI. Percentagens obtidas no Porto de Aveiro aplicando o segundo método (configuração B).

Promulgado \ Simulado				
	51,75	9,65	0,00	0,00
	7,02	14,91	2,64	0,00
	0,00	4,39	6,14	0,00
	0,00	0,00	1,75	1,75

Como última análise e tendo sido aplicado o segundo método no Porto de Aveiro, certificou-se que a percentagem de concordância foi de 74,55% (Tabela VI). Neste método também existiu um equilíbrio entre as percentagens opostas à diagonal.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados ilustrados nas Figuras 2-5 mostram que as diferenças no desempenho da rede entre a configuração A e a configuração B são residuais, o que implica que as variáveis usadas na configuração A mas rejeitadas na configuração B, nomeadamente, a altura significativa e declividade média (mais corretamente a diferença entre os valores médios e os valores máximos, ao longo do azimute de entrada, da altura significativa e declividade) a direção média da ondulação e a maré, não são relevantes no processo de decisão sobre o estado da barra.

Os testes com os diferentes esquemas de convergência apresentam desempenhos muito próximos (na ordem dos 70%), com ligeiras diferenças que beneficiam em geral o segundo método. Em particular, o segundo método apresenta menor enviesamento que o primeiro, não exibindo desvios acima de um nível entre a simulação e a promulgação.

Analisando em maior detalhe a origem dos desvios entre a simulação do estado da barra e o estado da barra que resulta da decisão humana (na ordem dos 30%) constata-se que esta diferença se deve em larga medida ao facto da rede exibir variabilidade de curto prazo, ao contrário da decisão humana que tende a ter um tempo de permanência mais longo. A rede neuronal implementada é apenas sensível às condições ambientais do momento, enquanto o Homem se baseia nas previsões para a tomada de decisão.

Agradecimentos

O presente trabalho é uma contribuição para o projeto SIMOcean (*System for Integrated Monitoring of the Ocean*), Project PT02_Aviso5_0001, parcialmente suportado pelo mecanismo de financiamento da Área Económica Europeia (*EEA Grants*).

REFERÊNCIAS

Cortez, P., Neves, J. (2000). Redes Neuronais Artificiais.

Instituto Hidrográfico (2015). Roteiro da Costa de Portugal do Rio Minho ao Cabo Carvoeiro 4ªEdição, PN01, ISBN 978-989-705-082-4.

Mota, P., Van Golde, I., Pinto, J. (2014). O sistema de previsão operacional do Instituto Hidrográfico. 3ª Jornadas de Engenharia Hidrográfica, 99-102.

Sistema de Alerta para a Navegação em Portos

L. Pinheiro (1), P. Lopes (1,2), C. Fortes (1), J. Santos (3), P. Poseiro (1) e T. Reis (1)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil. lpinheiro@lnec.pt.

(2) Universidade dos Açores.

(3) Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Resumo: Nesta comunicação, descreve-se um sistema de previsão e alerta baseado na avaliação do risco associado e ao comportamento de navios em manobra ou amarrados em zonas portuárias. Trata-se de uma extensão do HIDRALERTA (associado aos fenómenos de galgamentos oceânicos e inundações em zonas costeiras e portuárias), e tal como este, tem como ideia-base a utilização de previsões da agitação marítima (a 72 horas) para calcular os seus efeitos, neste caso, sobre os navios, quer nas manobras de aproximação ao porto quer quando se encontram acostados no interior deste. O sistema está a ser implementado numa plataforma Web e é constituído por 4 módulos: Características da Agitação Marítima; Navegação em zonas portuárias; Avaliação do risco e Sistema de Alerta. O porto da Praia da Vitória constitui a primeira aplicação prática do sistema e ilustra as suas potencialidades.

Palavras-chave: Navegação, previsão em tempo real; sistema de alerta.

1. INTRODUÇÃO

Os riscos associados à navegação e atracação de navios no interior de portos são uma das principais preocupações para as autoridades portuárias, autoridades marítimas e agentes marítimos. A agitação marítima pode perturbar quer as manobras de aproximação dos navios ao porto quer as atividades de carga e descarga de navios, bem como a segurança de pessoas, bens materiais, infraestruturas portuárias e embarcações presentes no interior de um porto.

Assim, o desenvolvimento de instrumentos de auxílio às autoridades competentes que permitam prevenir situações de emergência e de risco associadas à ação da agitação marítima é fundamental para o planeamento e gestão integrada de zonas portuárias que visem minimizar esses riscos.

Neste âmbito, encontra-se em desenvolvimento no LNEC um sistema de previsão, alerta e avaliação de risco associado aos galgamentos e inundações em zonas costeiras e portuárias, denominado sistema HIDRALERTA (Fortes *et al.* 2015, Poseiro *et al.*, 2014; Sabino *et al.*, 2015). Esse sistema está em funcionamento para o porto e baía da Praia da Vitória e para a zona da Costa da Caparica, Almada.

No sentido de estender as funcionalidades deste sistema à previsão, alerta e avaliação do risco associado à navegação em zonas portuárias e/ou ao comportamento de navios amarrados, desenvolveu-se um novo sistema denominado SWAMS_ALERTA (Pinheiro *et al.* 2013), que tem em conta essas duas vertentes.

O sistema SWAMS_ALERTA utiliza as medições e previsões de agitação marítima para a determinação dos seus efeitos em termos de valores de movimentos verticais excessivos de um navio em manobra no acesso a uma bacia portuária ou em termos de movimentos nos seis graus de liberdade e forças nas amarras e defensas quando o navio se encontra atracado no cais. Para tal, o sistema recorre a modelos numéricos. A comparação destes valores com valores máximos admissíveis pré-estabelecidos permite a avaliação, em tempo real, de situações de emergência e a emissão de alertas dirigidos às entidades competentes.

Nesta comunicação faz-se uma breve descrição do sistema SWAMS_ALERTA, de previsão e alerta do risco associado à atracação de navios em zonas portuárias e ilustra-se a aplicação deste sistema ao porto de Praia da Vitória.

2. SISTEMA SWAMS_ALERTA

O sistema SWAMS_ALERTA é um sistema de previsão e alerta de situações de emergência e de avaliação de risco associado à navegação em zonas portuárias. O sistema utiliza diversos modelos numéricos: para a propagação e deformação da agitação marítima (SWAN, Booij *et al.* 1999, e DREAMS, Fortes 1993) e para a determinação dos movimentos dos navios (WAMIT, Korsemeyer 1988) e das forças no seu sistema de amarração (BAS, Mynett 1985). Está a ser desenvolvido um protótipo para a área portuária e respetiva baía da Praia da Vitória, Terceira, Açores. Este sistema é uma extensão do sistema em funcionamento, para a previsão, alerta e avaliação do risco associado ao galgamento e inundação de zonas portuárias e costeiras.

A comparação destes valores com valores máximos admissíveis pré-estabelecidos permite: a) a avaliação, em tempo real, de situações de emergência e a emissão de alertas dirigidos às entidades competentes sempre que se preveja estar em causa a segurança de pessoas, bens ou atividades desenvolvidas; b) a construção de mapas de risco, considerando séries temporais longas de previsão da agitação marítima ou cenários pré-definidos associados a mudanças climáticas e/ou a eventos extremos.

O sistema é constituído por quatro módulos (Figura 1), I – Características da Agitação Marítima; II – Navegação em zonas portuárias; III – Avaliação do risco e IV - Sistema de Alerta. O sistema está a ser desenvolvido em linguagem Python e implementado numa plataforma Web.

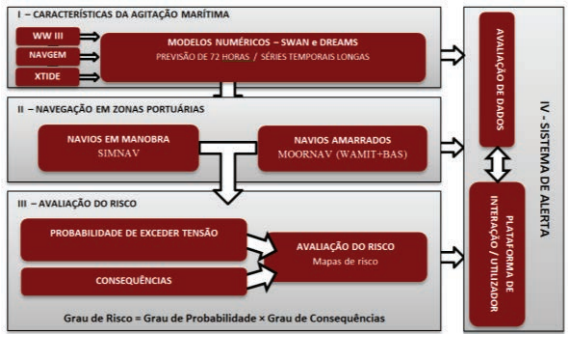


Fig. 1. Esquema do sistema SWAMS_ALERTA.

A descrição detalhada dos diferentes módulos pode ser consultada em Lopes *et al.* (2016).

3. APLICAÇÃO PILOTO

A aplicação do sistema SWAMS_ALERTA ao porto da Praia da Vitória, é efetuada todos os dias e permite a previsão a 72 horas dos efeitos da agitação marítima em termos de movimentos dos navios acostados ao cais principal (cais 12), Fig. 2.

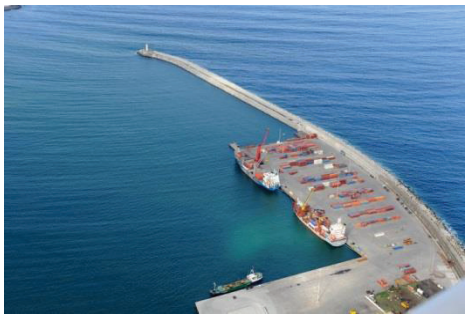


Fig. 2. Cais de contentores do porto de Praia da Vitória.

Para a caracterização da agitação marítima (H_s – altura significativa, T_m – período médio, T_p – período de pico e Θ - direção) ao largo da Praia da Vitória, o sistema utiliza, uma vez por dia, os resultados das previsões da agitação marítima, para as 72 horas seguintes, obtidos com o modelo WW III e que são disponibilizados pelo The Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC) de 3 em 3 horas. Para a área em questão, os dados do modelo WW III estão disponíveis com resolução de 1º, desde setembro de 2003. Os dados de vento regional e de níveis de maré, necessários para correr juntamente com os dados do modelo WW III no modelo SWAN, Booij *et al.* (1999), são disponibilizados também pela FNMOC, através do modelo NAVGEM (Whitcomb, 2012), e pelo software XTide, respetivamente. Este último é um modelo de previsão de maré astronómica que dispõe de informações de marés desde 1700 até 2100. Como exemplo, apresenta-se na Fig. 3 um Layout gerado pelo sistema para os dados provenientes do WW III, Hs e Θ.

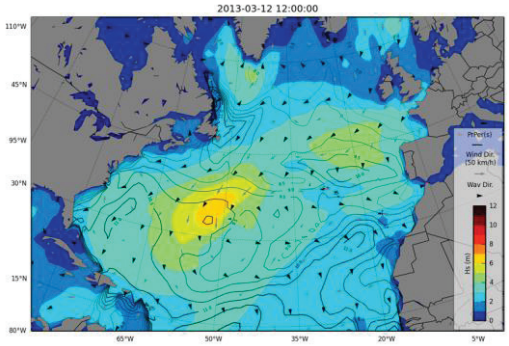


Fig. 3. Exemplo do Layout gerado pelo sistema para os dados provenientes do WW III, Hs e Θ.

Dos resultados apresentados pelo modelo WW III são extraídos os valores que se encontram mais perto da Ilha Terceira para que estes representem as condições de fronteira para os modelos que serão usados de seguida. Esses valores são transferidos para o interior do porto e da baía da Praia da Vitória com recurso aos dois modelos de propagação e deformação da agitação marítima: o modelo SWAN e o modelo DREAMS. A utilização dos modelos e as suas condições de aplicação encontram-se descritas em Poseiro *et al.* (2014). Na Fig. 4 são apresentados o tipo de layouts gerados pelo sistema de alerta para os resultados obtidos pelos modelos SWAN e DREAMS, H_s e Θ.

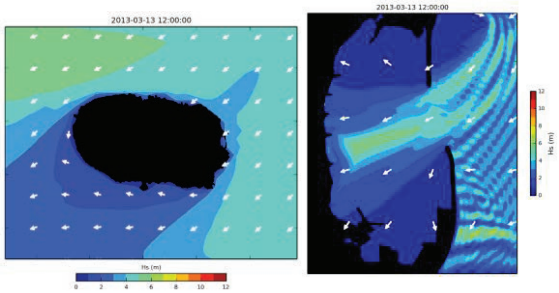


Fig. 4. Layouts do sistema de alerta para os resultados obtidos pelo modelo SWAN, Hs e Θ, e DREAMS, Hs e Θ.

Para a primeira aplicação deste sistema foi escolhido um navio e um posto de acostagem no terminal de contentores do porto de Praia da Vitória. Para a aplicação dos modelos WAMIT e BAS, é necessário definir as características do navio e do sistema de

amarração. A metodologia encontra-se descrita em Pinheiro *et al.* (2013).

O navio estudado representa um casco genérico do tipo porta-contentores com um volume deslocado de 12 717 m^3, um comprimento na flutuação de 120 m, uma boca de 19 m e um calado de 8 m. A forma do casco foi discretizada com 3464 painéis retangulares e triangulares. Considerou-se que o navio estava colocado numa zona de fundo horizontal com a profundidade de 10 m. O navio está amarrado ao cais por 6 amarras (1 lançante à popa, outro à proa, duas regeiras e 2 traveses). O contacto entre o navio e o cais é impedido por cinco defensas pneumáticas. Considerou-se a mesma relação constitutiva para todos os cabos do sistema de amarração: variação linear desde 0 kN até à carga máxima de 931 kN a que corresponde uma extensão de 8%. A relação constitutiva das defensas também é linear sendo a força de compressão máxima 4900 kN para uma deflexão de 1 m.

Para cada valor de agitação marítima prevista no modulo I, e com base nos dados anteriores, nas funções de resposta a impulso do navio livre e nas massas adicionadas para frequência infinita, determinaram-se as séries temporais das forças exercidas pela agitação marítima incidente no navio. São depois resolvidas, no domínio do tempo, as equações de movimento de um navio amarrado levando em conta as relações constitutivas dos elementos do sistema de amarração. Da resolução destas equações obtêm-se as séries temporais dos movimentos do centro de gravidade do navio e dos esforços no sistema de amarração.

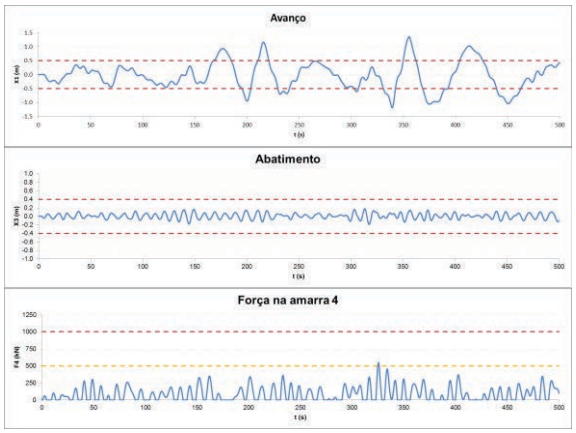


Fig. 5. Exemplo das séries temporais de movimentos e forças gerados.

A plataforma Web permite, para além dos *layouts* da Fig. 3 e da Fig. 4, a visualização da agitação marítima junto ao navio, os valores máximos dos movimentos de avanço, de deriva e de balanço, bem como as forças nas amarras (Fig. 6 e Fig. 7).

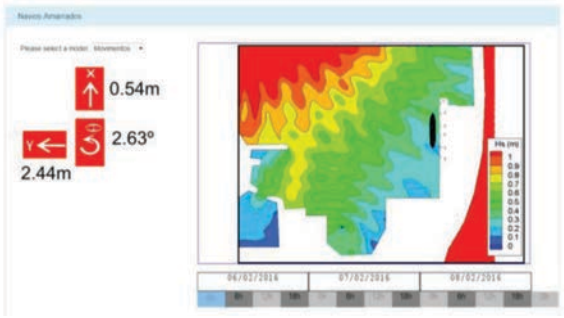


Fig. 6. Layout do mapa de alerta de movimentos gerado pelo sistema.

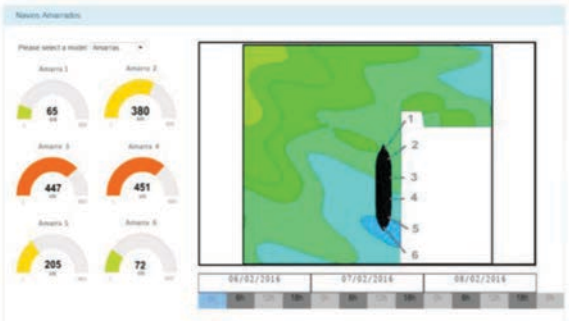


Fig. 7. Layout do mapa de alerta de forças nos cabos gerado pelo sistema.

É possível também visualizar os níveis de alerta obtidos nessa zona para o dia e hora referidos. Os níveis de alerta são definidos de acordo com uma análise feita "a priori" dos valores máximos para os movimentos do navio e para os esforços nos elementos do sistema de amarração, tendo em conta as consequências para as atividades de carga e descarga e a segurança de pessoas, bens e do navio. Diversas organizações ligadas à atividade marítimo-portuária têm vindo a emitir recomendações de limites às alturas de onda, às amplitudes, às velocidades dos movimentos dos navios e aos esforços nos elementos de amarração (*OCIMF, 1992;* PIANC 1995). Os valores adotados neste trabalho baseiam-se nas recomendações da PIANC (1995) mas podem ser definidos caso a caso de acordo com critérios e normas internas de cada administração portuária.

Os limites aos movimentos horizontais, verticais ou de rotação dependem das consequências associadas. Existem limites operacionais, a partir dos quais a movimentação de carga fica condicionada ou mesmo impossibilitada e limites de segurança, a partir dos quais existe risco para as pessoas, os bens ou as estruturas.

Quanto aos limites aos esforços nos elementos de amarração, a OCIMF, por exemplo, recomenda que os esforços sejam distribuídos de forma uniforme pelas amarras e que estes não excedam 55% do esforço máximo de rotura. A PIANC, através de grupos de trabalho, elabora com regularidade relatórios com recomendações sobre os movimentos máximos de navios amarrados.

Recentemente, um grupo de trabalho da PIANC atualizou as diretrizes para os movimentos máximos de porta-contentores amarrados que garantem uma operação de descarga eficiente (PIANC, 2012). Nesse relatório conclui-se que para grandes navios porta-contentores, a limitação do movimento de avanço é fundamental, uma vez que, hoje em dia, os guindastes não conseguem acompanhar esse movimento de forma eficiente. O mesmo relatório afirma que, quando os movimentos de avanço são mantidos dentro dos limites prescritos, os restantes movimentos acabam por ficar também eles dentro de limites aceitáveis.

Nesta primeira fase, os diferentes níveis de alerta têm o seguinte significado:

- Verde (0) – Sem perigo;
- Amarelo (1) – Atividade de carga e descarga condicionada;
- Vermelho (2) – Nível de alerta máximo. Não é possível efetuar atividades de carga e descarga do navio. Possibilidade de ocorrência de roturas de amarras. As infraestruturas podem ficar seriamente danificadas.

É de salientar que a validação do sistema para este porto é um processo em curso. Até agora, já foi efetuada a validação do sistema para o módulo I com recurso a dados da boia ondógrafo da Administração do Porto de Lisboa, e encontra-se em realização a validação do módulo II no decurso deste Inverno.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, o sistema SWAMS_ALERTA tem acoplados todos os elementos necessários para a emissão de alertas em tempo real, mas ainda há alguns aspetos a serem melhorados, especialmente no módulo IV, no que diz respeito à definição dos níveis de alerta a considerar.

O trabalho futuro passa necessariamente pela validação do sistema, nomeadamente dos seus módulo II e IV, com a colaboração das autoridades locais e com a utilização de dados históricos, no sentido de garantir a fiabilidade do sistema. Mais ainda, é importante efetuar uma análise de risco detalhada com base na identificação das consequências que lhe possam estar associadas.

Agradecimentos

Agradece-se o financiamento dos projetos HIDRALERTA (PTDC/AAC-AMB/120702/2010), e ESTRAMAR (MAC/3/C177 – FEDER 2007/2013). Agradece-se a colaboração da universidade dos Açores, Câmara Municipal da Praia da Vitória e Portos dos Açores.

REFERÊNCIAS

Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. J. Geographical Res., C4(104), 7649-7666.

Fortes, C.J.E.M. (1993). Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, IST, Lisboa, Portugal.

Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Poseiro, P., *et al.* (2015). Ferramenta de Apoio à Gestão Costeira e Portuária: o Sistema HIDRALERTA. In Atas do VIII CPGZC, Aveiro, Outubro 2015.

Lopes, P., Poseiro, P., Fortes, C.J.E.M., *et al.*. (2016). Otimização da arquitetura computacional do sistema HIDRALERTA. 13º Congresso da Água. 7, 8 e 9 de março de 2016, LNEC, Lisboa.

Korsemeyer F.T., Lee C.-H., Newman J.N., Sclavounos P.D. (1988). The analysis of wave effects on tension-leg platforms, 7th International Conference Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Houston, Texas, pp. 1-14.

Mynett, A.E., Keunig, P.J.,Vis, F.C. (1985). The dynamic behaviour of moored vessels inside a harbour configuration. Int. Conf. on Numerical Modelling of Ports and Harbours, Birmingham, England: 23-25 April 1985. Cranfield: BHRA, The Fluid Engineering Centre.

OCIMF (1992) Mooring equipment guidelines. Witherby e Co. Ltd.

PIANC (1995) Criteria for movements of moored ships in harbors. Technical report Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC) Supp. to bulletin no. 88.

Pinheiro, L.V., Santos, J.A., Abecasis Jalles, B.M, Fortes, C.J.E.M. (2013). Aplicação da ferramenta SWAMS ao comportamento de um navio amarrado no terminal XXI do porto de Sines. 8 JPECP, LNEC Lisboa, Portugal, Outubro.

Poseiro, P., Fortes, C., Reis, M.T., Santos, J.A. (2014). Aplicações do sistema de previsão e alerta do risco de galgamentos em zonas costeiras e portuárias: Costa da Caparica e Praia da Vitória. In Atas do VI SEMENGO, Rio Grande, Brasil.

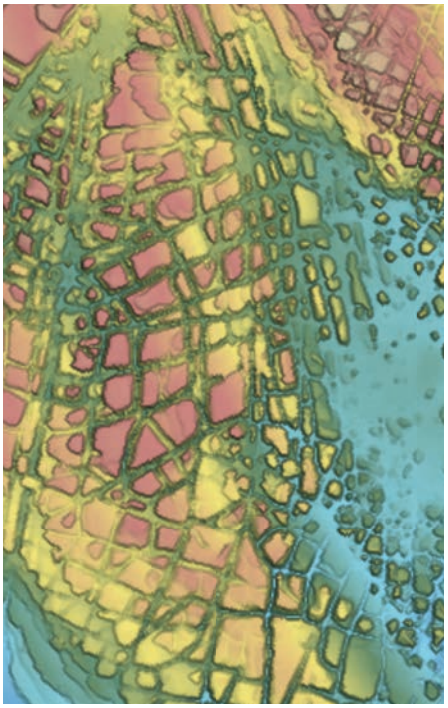
Sabino, A., Rodrigues, A., Poseiro, P., Reis, M.T., Fortes, C.J.E.M., Reis, R. (2015). Coastal risk forecast system. In Proc. 1st Int. Conf. on Geog. Inf. Syst. Theory, Applications and Management, C. Grueau & J.G. Rocha (Eds.), scitepress,201-209. ISBN:978-989-758-099-4.

Whitcomb, T. (2012). Navy global forecast system, NAVGEM: Distribution and user support. In: Proceedings of the 2nd Scientific Workshop on ONR DRI: Unified Parameterization for Extended Range Prediction.

OCEANOGRAFIA OPERACIONAL

4as JORNADAS DE ENGENHARIA HIDROGRÁFICA

21, 22 E 23 DE JUNHO DE 2016



Análise de dados de agitação num ponto da costa portuguesa. Implicações para o dimensionamento de quebra-mares verticais.

Autores: R. Ferreira (1), M. G. Neves (1,2) e Tiago Oliveira (3, 4), Rita Esteves (5)

(1) FCT/UNL. Campus da Caparica, 2829-526 Caparica, rmc.ferreira@campus.fct.unl.pt.

(2) LNEC, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa.

(3) WHOI, Woods Hole, Massachusetts 02543, USA.

(4) University of Haifa, Mount Carmel, Haifa 3498838, Israel.

(5) Instituo Hidrigráfico, Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa.

Resumo: Com base em 10 anos de dados de temporais medidos na boía ondógrafo de Sines entre os anos 2001 e 2010, analisaram-se as características de diversos parâmetros da agitação, entre as quais as alturas de onda (significativa e máxima), o período médio e a direção de agitação. Em particular estudou-se a relação entre alturas de onda máxima e alturas de onda significativa durante condições de temporal, compararam-se as relações encontradas com as propostas na literatura e usualmente aplicadas no dimensionamento de quebra-mares verticais, e analisou-se a sua influência na estabilidade dessas estruturas. Verificou-se que os coeficientes de segurança calculados com base em valores de altura máxima registada são inferiores aos calculados com a relação proposta na literatura.

Palavras-chave: Altura de onda máxima, altura de onda significativa, boía ondógrafo, dimensionamento, Sines, quebra-mar vertical.

1. INTRODUÇÃO

É comum, no projecto de estruturas marítimas, apenas se dispor de dados de altura de onda significativa, H_s, provenientes, por exemplo, de modelos de hindcast ou de medições efectuadas com bóias ondógrafo. No entanto, as fõrmulas de cálculo de forças em quebra-mares verticais são função da da altura de onda máxima, $H_{max.}$

Existem várias relações propostas na literatura entre H_{max} e H_s. A mais utilizada no dimensionamento de quebra-mares verticais é a proposta por Goda (1985), que considera, fora da zona de rebentação, uma relação constante entre H_{max} e H_s igual a 1,8.

Pita e Abecasis (1998), considerando que a distribuição das alturas de onda segue uma distribuição de Rayleigh, analizaram a relação entre H_{max} e H_s em função da duração dos temporais medidos ao largo de Sines entre 1981 e 1998.

Com base em dados obtidos entre 2001 e 2010, por uma bóia ondógrafo, localizada ao largo de Sines, analisou-se a relação existente entre H_{max} e H_s e comparou-se com os valores sugeridos na literatura. Verificou-se ainda como a utilização dos valores de H_{max} medidos em Sines, em vez dos usuais valores calculados em função de H_s, alteravam os valores dos coeficientes de segurança ao deslizamento e ao derrubamento de um quebra-mar vertical com dimensões compatíveis com as condições da costa oeste de Portugal.

2. ANÁLISE DE TEMPORAIS MEDIDOS EM SINES

A recolha de dados de agitação ao largo de Sines é feita através da utilização de uma bóia ondógrafo direcional, gerida pelo Instituto Hidrográfico, que está localizada nas coordenadas 37º 55’ 16’’ N e 08º 55’ 44’’ W, a uma profundidade de 97m.

Com base nos registos adquiridos nessa bóia de Sines ao longo de um período de 10 anos, entre 2001 e 2010, analisaram-se as características da agitação em condições de temporal. Consideraram-se os seguintes critérios para a definição de eventos como temporais: $H_s \geq 4{,}5$m; duração mínima do temporal de 6 horas; duração mínima entre temporais de 6 horas.

Aplicando estes critérios, apresenta-se na Figura 1 o número de temporais registados e as suas respetivas durações em cada um dos anos em análise.

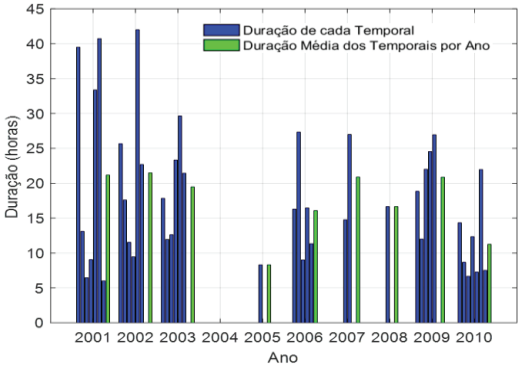


Fig.1. Duração (em horas) de cada temporal registado entre os anos 2001 e 2010 em Sines.

Observa-se que durante estes 10 anos ocorreu um total de 40 temporais. Os anos 2001 e 2010 foram os mais fustigados pela ocorrência de temporais, com 7 eventos observados em cada um destes anos. O evento mais longo registado ocorreu no ano 2002 e teve uma duração de 42 horas. Verifica-se ainda que os temporais de maiores durações ocorreram em 2001 e 2002.

Para cada um dos temporais analizaram-se os valores máximos da altura de onda máxima, H_{max}, e significativa, H_s (Figura 2). Os maiores valores de H_{max} ocorreram entre 2001 e 2003 e o valor mais alto de H_{max}, de 15,2 m, ocorreu no 1ª temporal de 2002.

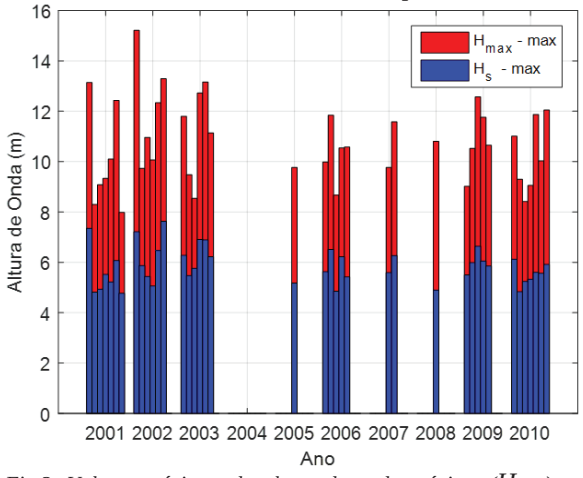


Fig.2. Valores máximos de altura de onda máxima (H_{max}) e significativa (H_s) de cada temporal registado entre 2001 e 2010.

Com base em todos os registos efetuados durante cada um dos 40 temporais no período em análise, que totalizaram 1048 registos, calculou-se o valor da relação H_{max}/H_s e comparou-se com o respectivo valor de H_s (Figura 3).

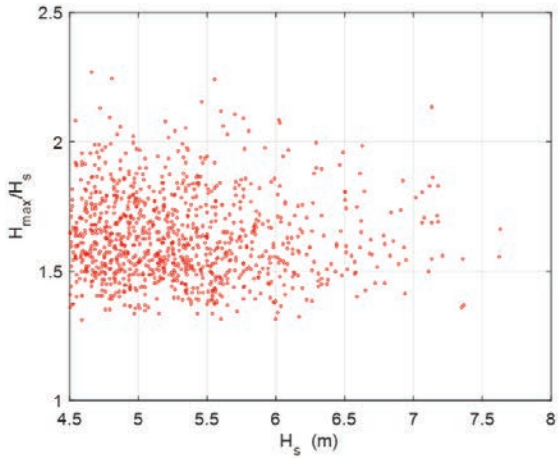


Fig.3. Valores H_{max}/H_s em função da altura significativa (H_s) para os anos 2001 a 2010.

Como se pode observar da Figura 3, os valores de H_{max}/H_s de todos os registos de temporal variam entre 1,3 e 2,3. Apenas 15% dos valores são superiores a 1,8 e estes valores correspondem a ondas que provêm de uma gama de direções compreendida entre 250º (W-20ºS) e 320º (W – 50º N), que é a gama onde se concentram 97% dos registos de temporal. Relativamente aos períodos de pico, T_p, os registos em que H_{max}/H_s medido é superior a 1,8 correspondem a ondas com $T_p$variável entre 11 s e 19 s, que corresponde à gama onde se concentram 89% dos registos de temporal.

Como referido anteriormente, existem diversas propostas na literatura para o cálculo do valor da relação H_{max}/H_s. No projeto de quebra-mares verticais é habitual aplicar-se a aproximação referida por Goda (1985) (equação 1), onde H_{max} depende apenas de H_s:

$$H_{max} = 1{,}8\ H_s \qquad (1)$$

Considerando que a distribuição das alturas de onda segue uma distribuição de Rayleigh, a relação entre H_{max}, H_s e o número de ondas (N) presentes no temporal, é dada por (Pita e Abecassis, 1998):

$$H_{max} = \sqrt{\frac{\ln(N)}{2}}\ H_s \qquad (2)$$

Calcularam-se, assim, os valores H_{max}/H_s obtidos aplicando a equação (2) para os 40 temporais identificados em Sines durante os 10 anos em análise e compararam-se com os valores medidos (Figura 4). Verificou-se que a relação H_{max}/H_s calculada utilizando os dados, $H_{max,Registado}/H_s$, apresenta valores numa gama mais alargada que a dos valores obtidos com base na equação (2), $H_{max,Teórico}/H_s$. Efetivamente, enquanto os valores máximos em cada temporal de $H_{max,Registado}/H_s$ variam entre 1,7 e 2,3, os correspondentes máximos da relação $H_{max,Teórico}/H_s$ situam-se entre 1,7 e 2,0. Comparando estes resultados com a aproximação teórica referida por Goda (equação 1), constata-se que em 90% dos valores máximos dos temporais (36 num total de 40), os máximos de $H_{max,Registado}/H_s$ são superiores a 1,8. No caso da altura máxima , verifica-se que em 70% das temporais (28 em 40) os máximos de $H_{max,Teórico}/H_s$ são superiores a 1,8.

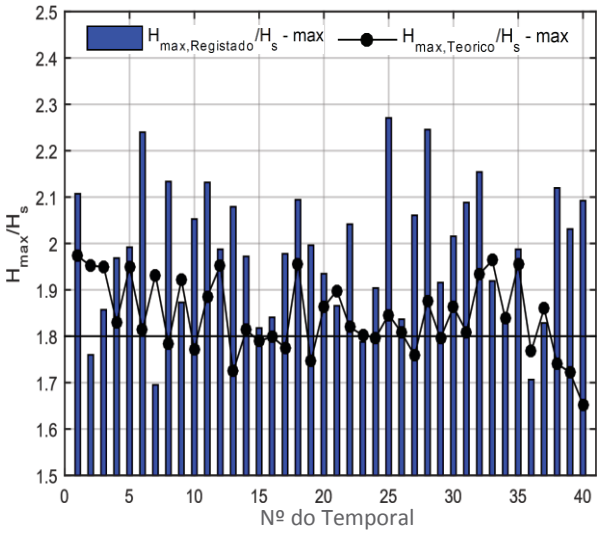


Fig.4. H_{max}/H_s calculado com as alturas máximas (H_{max}) teóricas e registadas, por cada temporal de 2001 a 2010.

3. DIMENSIONAMENTO DE QUEBRA-MARES VERTICAIS

O dimensionamento de quebra-mares verticais é normalmente realizado utilizando fórmulas empíricas ou semi-empíricas para o cálculo das forças e respetivos momentos devidos à agitação marítima. As fórmulas mais utilizadas em projeto são as de Goda (1985) e de Takahashi (1996). A fórmula de Takahashi é uma modificação à formula de Goda para ter em conta a rebentação de ondas sobre a estrutura. Ambas as formulações dizem respeito à análise do equilíbrio estático da estrutura. No caso dos quebra-mares verticais procura-se garantir a estabilidade a duas formas de colapso: o deslizamento ("sliding") e o derrubamento ("overturning"), Figura 5.

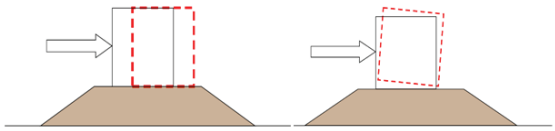


Fig. 5. Modos de colapso, deslizamento (esquerda) e derrubamento (direita) de um quebra-mar vertical, adaptado de Goda (1985).

A formulação de Goda propõe uma distribuição trapezoidal das pressões hidrodinâmicas ao longo da estrutura vertical do quebra-mar, tal como ilustrado na Figura 6.

Calculando a resulante das pressões e subpressões hidrodinâmicas obtêm-se as forças horizontais e verticais (F_H, F_V) para um estado de mar, bem como os seus respetivos momentos (M_H, M_V). As equações das pressões dadas por Goda são função da altura de onda máxima, tomada como igual a 1,8 H_s.

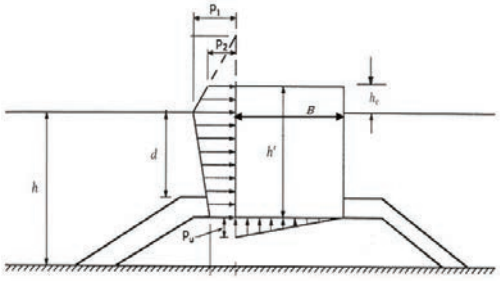


Fig.6. Distribuição de pressões hidrodinâmicas num quebra-mar vertical, adaptado de Goda (1985).

A estabilidade do quebra-mar vertical é verificada relacionando os esforços atuantes com o peso próprio da estrutura e o momento a ele associado, através do cálculo dos coeficientes de segurança ao deslizamento (C_{SD}) e ao derrubamento (C_{SV}), equação 3.

$$C_{SD} = \frac{\mu(P - F_V)}{\sum F_H}, C_{SV} = \frac{M_P - M_V}{\sum M_H} \qquad (3)$$

Nesta equação P é o peso próprio da estrutura por metro linear e M_P é o momento associado ao peso no ponto extremo do lado sotamar na base do caixotão. O valor mínimo destes coeficientes de segurança é usualmente fixado em 1,4.

A formulação de Takahashi, difere da de Goda por considerar a pressão hidrodinâmica associada à rebentação de ondas contra a parede vertical do quebra-mar. Esta pressão é designada por pressão impulsiva e pode atingir valores muito superiores aos das pressões habitualmente adotadas para o dimensionamento de quebra-mares. Takahashi (1996) propôs uma alteração à fórmula de Goda apenas no cálculo da pressão p_1 (ver Figura 6), de modo a incluir um termo respeitante à pressão impulsiva, tal como se segue:

$$p_1 = \frac{1}{2}[1 + \cos(\beta)][\alpha_1 + \alpha^* \cos(\beta)^2]\rho g H_{max}$$

$$\alpha^* = max\{\alpha_2; \alpha_1\}$$

β, α_1 e α_2 são parâmetros da formulação de Goda, ρ é a massa volúmica da água e g a aceleração da gravidade. A segurança da estrutura é verificada pelo cálculo das forças, momentos e coeficientes de segurança de acordo com a formulação de Goda (1985), considerando a alteração proposta por Takahashi (1996) no cálculo de p_1.

4. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DE UM QUEBRA-MAR VERTICAL

Para verificar a segurança de um quebra-mar vertical com base nos valores de H_{max} medidos e calculados como usualmente se faz no dimensionamento, isto é, H_{max}=1,8H_s, escolheu-se uma configuração da secção transversal (ver Figura 6) com as dimensões seguintes:

- profundidade em frente à estrutura: h = 32m;
- distância da superfície livre da água à banqueta de proteção: d = 13,5m;
- distância da superfície livre da água à base da parede vertical: h' = 17,5m;
- distância da superfície livre da água ao topo da parede vertical: h_c = 8m;
- largura do caixotão: B = 24m.

Nos cálculos dos coeficientes de segurança considerou-se um nível de maré de +4m (ZH), correspondente a uma preia-mar de águas vivas e considerou-se, como primeira aproximação, as condições de agitação à frente do quebra-mar vertical correspondem às medidas na boia de Sines.

Com base nesta configuração, calculou-se o peso próprio da estrutura por metro linear, cujo valor é P=9 399 kN/m. Calculou-se também o momento associado ao peso no ponto extremo do lado sotamar na base do caixotão, M_P = 112 788 kNm/m.

Com base na fórmula de Takahashi (1996) calcularam-se as forças e respetivos momentos para cada evento de temporal durante os 10 anos em análise e, com base nelas, os coeficientes de segurança ao deslizamento e ao derrubamento, utilizando os valores registados, $H_{max,Registado}$ e os valores calculados com a expressão de Goda, isto é, H_{max}= 1,8 H_s.

A Figura 7 apresenta os valores dos coeficientes de segurança ao deslizamento calculados com a fórmula de Takahashi (1996) para $H_{max,Registado}$, $C_{SD(Hmax,medido)}$ e para H_{max}= 1,8 H_s, $C_{SD(Hmax=\ 1,8\ Hs)}$, para cada um dos 1048 registos obtidos em condições de temporal ao longo dos 10 anos de monitorização em Sines.

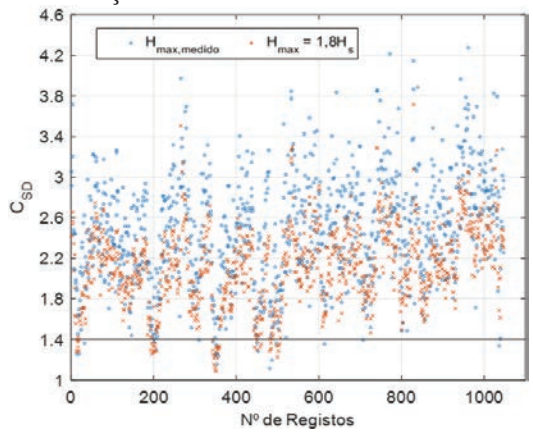


Fig. 7. Coeficiente de segurança ao deslizamento (C_{SD}) obtido com H_{max} proveniente dos registos e com H_{max}= 1,8 H_s.

Alguns valores mínimos deste coeficiente são inferiores ao valor normalmente considerado como mínimo em projeto (1,4), pelo que se conclui que as dimensões consideradas como exemplo para a configuração do quebra-mar não garantem a estabilidade da estrutura ao deslizamento. Com efeito, o valor de $C_{SD(Hmax,medido)}$ varia entre 1,0 e 4,3, enquanto o $C_{SD(Hmax=1,8\ Hs)}$ situa-se entre 1,1 e 3,72.

Observou-se que 2,1% dos valores de $C_{SD(Hmax,\ medido)}$ são inferiores a 1,4 e estes valores correspondem a valores de H_{max}/H_s entre 1,8 e 2,1. A estes valores correspondem direções entre 260º e 297º e períodos de pico entre 11,1s e 18,2s. Já para $C_{SD(Hmax=1,8\ Hs)}$, 4,6% dos valores são inferiores a 1,4 e estes valores correspondem a valores de H_{max}/H_s situados entre 1,4 e 2,1.

No que respeita à verificação da segurança ao derrubamento, os coeficientes $C_{SV(Hmax,medido)}$ e $C_{SV(Hmax=1,8Hs)}$, obtidos para as condições anteriormente referidas estão apresentados na Figura 8. Os valores de $C_{SV(Hmax,medido)}$ têm um mínimo de 1,95 e um máximo de 9,06, enquato o coeficiente $C_{SV(Hmax=1,8Hs)}$ varia de 2,16 até 7,45, ou seja, a segurança ao derrubamento está verificada.

Dado que os valores mais baixos destes coeficientes são os mais condicionantes para a segurança estrutural, analizaram-se os mínimos de C_{SD} e C_{SV}, que correspondem ao cálculo com os valores medidos de H_{max}, e verificou-se que correspondem a um registo cujo valor de H_{max} é de 15,2m, sendo este o valor mais alto entre todos os medidos em condições de temporal no período em análise, mas o correspondente valor de H_{max}/H_s é de 2,1, inferior ao valor mais alto registado, que foi de 2,3. O período de pico correspondente é de 18,2 s e a direção de 293º (W-23º-N).

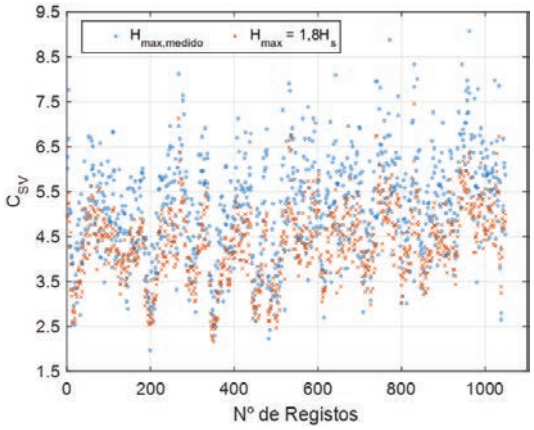


Fig.8. Coeficiente de segurança ao derrubamento (C_{SV}) obtido com H_{max} proveniente dos registos e com H_{max}= 1,8 H_s.

Quanto aos mínimos de $C_{SD(Hmax=1,8Hs)}$ e de $C_{SV(Hmax=1,8Hs)}$, estes foram estimados para valores de H_s que se encontram nos 3% das alturas significativas mais elevadas que foram registadas.

5. CONCLUSÕES

Com base na análise da relação entre os valores das alturas de onda significativa e máxima registadas em dez anos de dados de temporais ao largo de Sines, concluíu-se que em 90% dos temporais (36 temporais) o valor máximo de H_{max}/H_s obtido através dos dados de agitação marítima adquiridos *in situ* resultam em valores superiores aos propostos na literatura para o dimensionamento de quebra-mares verticais, que consideram esta relação constante e igual a 1,8.

Os valores mínimos dos coeficientes de segurança calculados com base em valores de altura máxima registada são inferiores aos calculados com a relação utilizada em projeto. Verificou-se ainda que, para ambos os casos, o menor valor do coeficiente de segurança, neste caso ao deslizamento, correspondeu ao maior valor medido de H_{max} mas não ao maior valor de H_{max}/H_s. Relativamente aos casos em que se obteve coeficientes de segurança inferiores aos desejáveis, estes ocorreram para valores da relação H_{max}/H_s entre 1,8 e 2,1 para os coeficientes $C_{SD(Hmax,medido)}$. Estes resultados demonstram a importancia da informação obtida pelas bóias ondógrafo acerca de condições de temporais para o dimensionamento de estruturas marítimas.

REFERÊNCIAS

Goda, Y. (1985); *Random seas and design of maritime structures*, University of Tokio Press, Tóquio, Japão.

Pita, C. and Abecasis, F. (1998); Analysis of Wave Data at Sines. *In Proc. ICCE 1998, Copenhagen*, 985-998.

Takahashi, S. (1996); *Design of Vertical Brekwaters*, 105p., Port and Harbour Research Institute, Yokosuka, Japão.

Metodologia de análise e correção de medições de componentes de velocidade por ADV para propagação de ondas

J. M. P. Conde (1), C. F. Neves (2) e C. J. E. M. Fortes (3)

(1) UNIDEMI, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal. jpc@fct.unl.pt.

(2) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

(3) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

Resumo: Neste artigo apresenta-se uma metodologia que visa minimizar os erros associados à medição por ADV (*Acoustic Doppler Velocimetry*). Estes erros podem ter duas causas: insuficiência de partículas em suspensão na coluna de água; e desalinhamento dos eixos do ADV com os eixos coordenados do problema. Seguindo esta metodologia, aplica-se primeiramente um filtro digital para eliminar as frequências elevadas fisicamente irrealistas e, em seguida, aplica-se uma transformação de coordenadas para alinhar as componentes de velocidade medidas com o sistema de coordenadas do problema, sendo possível identificar o desalinhamento do ADV face a esse sistema de coordenadas. Apresenta-se a aplicação desta metodologia na propagação de ondas regulares num canal.

Palavras-chave: ADV, filtro digital, transformação de coordenadas, ondas regulares, canal de ondas.

1. INTRODUÇÃO

A medição por ADV (*Acoustic Doppler Velocimetry*) é uma técnica correntemente utilizada para medir as componentes de velocidade em pontos ao longo da coluna de água, podendo ser utilizada para ondas, para correntes ou ambas. Esta técnica depende da existência de partículas em suspensão na coluna de água em número suficiente. Ora, quando tal não acontece, esta técnica de medição pode conduzir a resultados fisicamente irrealistas ou inconsistentes com o fenómeno em estudo. Outro problema normalmente encontrado quando se utiliza esta técnica é o correto posicionamento do equipamento, nomeadamente, a correta orientação dos eixos do ADV com os eixos coordenados do problema.

Neste artigo descreve-se um conjunto de técnicas para correção destes problemas, nomeadamente o filtro digital utilizado (secção 2) e a técnica de correção do desalinhamento (secção 3). Apresenta-se também a instalação experimental e os ensaios realizados (secção 4), a metodologia aplicada aos dados experimentais obtidos (secção 5) e, por fim, as conclusões (secção 6).

2. FILTRO DIGITAL PASSA-BAIXO

O filtro digital passa-baixo utilizado foi desenvolvido por Thompson (1983). O processo de filtragem é obtido pela convolução entre função filtro, *w*, e a série de dados originais, *x*. A série de dados filtrada, *y*, é dada por:

$$y_t = \sum_{k=-n}^{n} w_k x_{t+k} \qquad (1)$$

Thompson impõe que a função filtro seja simétrica (w_k=w_{-k}) de forma a preservar a informação de fase e que seja normalizada:

$$\sum_{k=-n}^{n} w_k = 1 \qquad (2)$$

De modo a reduzir o fenómeno de Gibbs, Thompson propõe que a resposta desejável para o filtro, *L*, não seja uma descontinuidade na frequência de corte, mas uma função suave:

$$L(\omega) = \begin{cases} 1 & ,\omega < \Omega_1 \\ \frac{1}{2}\left\{1 + cos\left[\frac{\pi(\omega - \Omega_1)}{(\Omega_2 - \Omega_1)}\right]\right\} & ,\Omega_1 < \omega < \Omega_2 \\ 0 & ,\omega > \Omega_2 \end{cases} \qquad (3)$$

onde ω=2πf é a frequência angular, sendo f a frequência. A função filtro é obtida minimizando o desvio quadrático médio entre a resposta desejável, *L*, e a resposta efetiva do filtro, *R* (Thompson, 1983):

$$R(\omega) = w_0 + 2\sum_{k=1}^{n} w_k \, cos(\omega k) \qquad (4)$$

3. ALINHAMENTO DA VELOCIDADE

O correto alinhamento da sonda ADV, e consequentemente, dos seus eixos de coordenadas, com os eixos do canal de ondas é extremamente difícil face à sensibilidade da sonda. Pequenas inclinações da sonda (*e.g.* 2 graus) podem originar contaminações de uma componente da velocidade nas outras. Na maioria dos casos, precisões desta ordem no alinhamento são virtualmente impossíveis

de obter com meios correntes (níveis de bolha de ar, ou mesmo com o auxílio de laser).

A técnica utilizada (Neves *et al.*, 2012, Neves e Endres, 2013) parte do cálculo das correlações entre as componentes da velocidade (eq. 5) que constituem a matriz **F** (eq. 6). Os vetores próprios desta matriz indicam o alinhamento com a direção de propagação das ondas. É em seguida realizada a projeção das componentes da velocidade medidas neste alinhamento.

$$\left\langle u_i, u_j \right\rangle = \frac{1}{T} \int_{t1}^{t1+T} u_i(t) u_j(t) dt \qquad (5)$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \langle u_1,u_1\rangle & \langle u_1,u_2\rangle & \langle u_1,u_3\rangle \\ \langle u_2,u_1\rangle & \langle u_2,u_2\rangle & \langle u_2,u_3\rangle \\ \langle u_3,u_1\rangle & \langle u_3,u_2\rangle & \langle u_3,u_3\rangle \end{pmatrix} \qquad (6)$$

4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais foram realizados num dos canais de ondas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Figs. 1 e 2). Este canal está equipado com um gerador de ondas regulares/irregulares do tipo pistão controlado por uma placa de conversão A/D ligada a um computador pessoal. O gerador dispõe de um sistema de absorção dinâmica de ondas refletidas (Capitão e Conde, 2012), no entanto, nos ensaios realizados no âmbito deste artigo, este sistema não foi ativado, podendo-se deste modo garantir que, em todos os ensaios, as ondas são sempre geradas do mesmo modo, evitando as correções do movimento do gerador de ondas que poderiam diferir de ensaio para ensaio.



Fig. 1. Vista lateral do canal (cima), gerador de ondas (esquerda) e vista de cima do canal (direita).

Neste artigo apresentam-se resultados para ondas regulares, com período T=1.5 s e alturas de onda H=0.08 m. O nível de água a sotamar da rampa de declive 1:22 (na origem do referencial Oxyz) é d=0.3 m, de modo a obter condições sem rebentação ao longo do canal (Conde *et al.*, 2012). Nos ensaios experimentais foi efetuada a medição da elevação da superfície livre ao longo do canal utilizando sondas resistivas e das três componentes da velocidade em posições selecionadas ao longo do canal utilizando uma sonda ADV (Fig. 3).

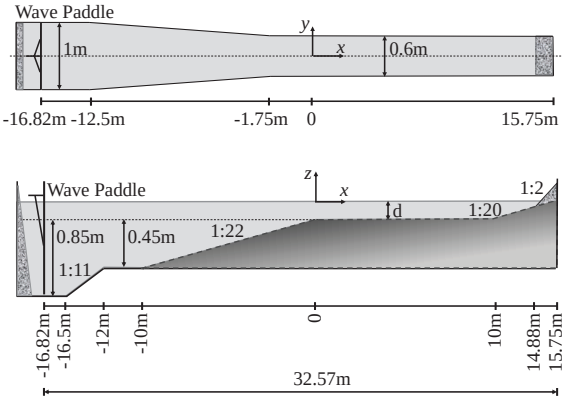


Fig. 2. Canal de ondas: planta (cima) e perfil longitudinal (baixo).



Fig. 3. Conjunto de 8 sondas resistivas (esquerda) e sondas ADV e sonda resistiva (direita).

5. METODOLOGIA E RESULTADOS

Para ilustrar a aplicação da metodologia são utilizadas as componentes de velocidade medidas no início do canal, na posição x=-10 m no eixo longitudinal (y=0) à profundidade z=-0,15 m.

Uma vez identificada a necessidade de filtrar as séries temporais das componentes de velocidade (Fig. 4), o primeiro passo é identificar as frequências fisicamente relevantes. Para tal, utiliza-se a transformada discreta de Fourier (DFT) considerando ciclos completos de forma a não originar atenuação nas amplitudes obtidas (Marple, 1987).

A figura 5 apresenta os espetros de amplitude para as séries originais. Nesta figura identificou-se que as componentes V_x e V_z tem a primeira e segunda harmónicas muito reduzidas. A componente V_y tem a frequência fundamental da mesma ordem de grandeza das primeira e segunda harmónicas. Apesar das harmónicas terem a mesma ordem de grandeza, optou-se, para ilustrar o processo de filtragem, por manter a frequência fundamental e a primeira harmónica. A tabela I apresenta os valores das amplitudes para cada uma das frequências para as três componentes de velocidade.

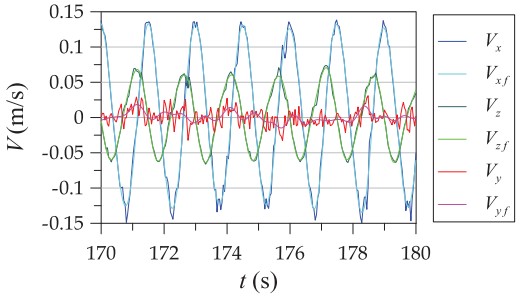


Fig. 4. Séries temporais das componentes de velocidade originais (V_x, V_y e V_z) e filtradas (V_{xf}, V_{yf} e V_{zf}).

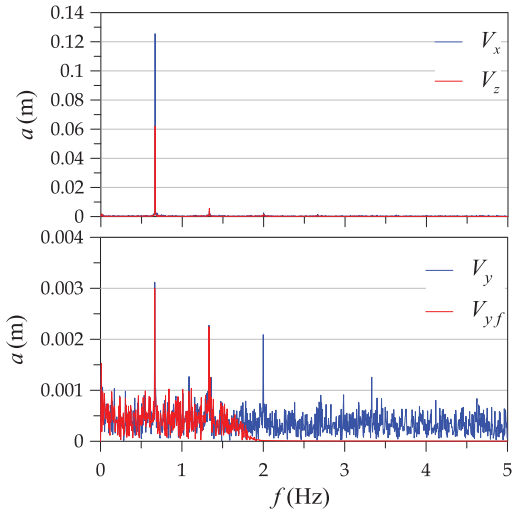


Fig. 5. Espectros de amplitude das componentes de velocidade originais (V_x, V_y e V_z) e filtrada (V_{yf}).

Tabela I. Amplitude das componentes de velocidade originais (V_x, V_y e V_z) e filtrada (V_{xf}, V_{yf} e V_{zf}).

	Freq. Fund.	1ª Harmon.	2ª Harmon.
f (Hz)	0.6667	1.3333	2
V_x (m/s)	0.1255	3.58E-03	2.59E-03
V_{xf} (m/s)	0.1257	3.61E-03	4.68E-06
V_y (m/s)	3.12E-03	2.27E-03	2.09E-03
V_{yf} (m/s)	3.00E-03	2.25E-03	1.57E-05
V_z (m/s)	0.0620	5.55E-03	1.56E-03
V_{zf} (m/s)	0.0621	5.45E-03	1.24E-05

A aplicação do filtro digital passa-baixo considerado pressupõe a escolha de três parâmetros: as frequências f_1 e f_2 (correspondentes a Ω_1 e Ω_2 na eq. 3); e o número de pesos, n (eq. 1). A figura 6 apresenta a distribuição de pesos, w, e a resposta em frequência do filtro, R, impondo f_1 e n e variando f_2. A figura 7 apresenta a resposta em frequência do filtro, R, impondo f_1 e f_2 e variando n.

A observação das figuras 6 e 7 permite concluir que à medida que f_2-f_1 ou n diminuem aumenta o efeito de Gibbs. O aumento de f_2-f_1 tem como consequência que a atenuação progressiva do filtro afete uma banda de frequências maior. O aumento de n diminuí o efeito de Gibbs mas origina um sinal filtrado com $2n$ valores a menos (consequência da aplicação da eq. 1).

Torna-se necessário fazer um balanço entre estes fatores. Face aos resultados apresentados escolheu-se o filtro com f_1=1.5Hz, f_2=2Hz e n=120. Os resultados da aplicação deste filtro encontram-se apresentados nas figuras 4 e 5. A tabela I apresenta as amplitudes para a frequência fundamental, primeira harmónica e segunda harmónica dos valores filtrados. Na figura 5 é visível a resposta do filtro na componente V_{yf} (diminuição da resposta entre 1,5 Hz e 2 Hz). Na tabela I constata-se que a frequência fundamental e a primeira harmónica não sofrem variação apreciável, por seu lado a segunda harmónica está claramente atenuada.

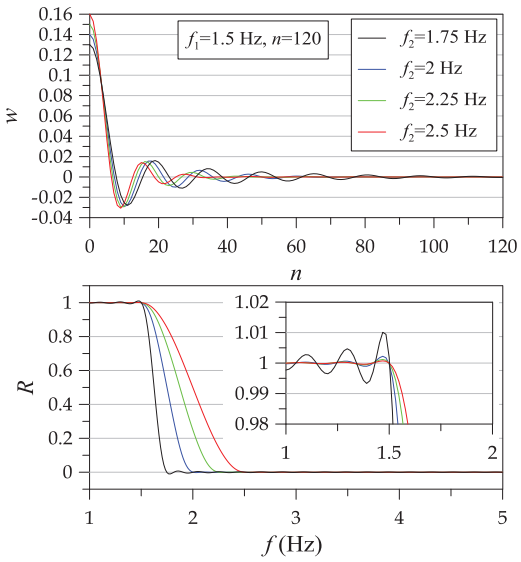


Fig. 6. Distribuição de pesos, w, e resposta em frequência do filtro, R, impondo f_1 e n e variando f_2.

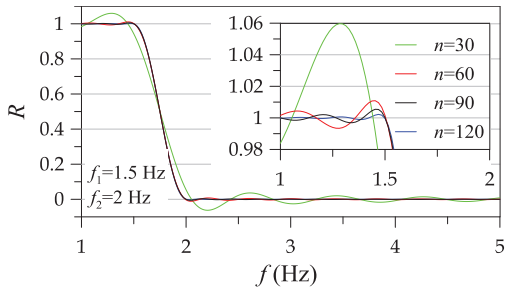


Fig. 7. Resposta em frequência do filtro, R, impondo f_1 e f_2 e variando n.

Após a aplicação do filtro pode-se identificar o desalinhamento da sonda face a direção de propagação das ondas. Determina-se a matriz **F** (eq. 6) e os seus valores e vetores próprios. Os vetores próprios indicam o alinhamento com a direção de propagação da onda. A figura 8 apresenta a vermelho esses eixos. Constata-se que neste caso o desalinhamento é da ordem de 2.5º. Esta figura apresenta os valores de velocidade originais e os obtidos após filtragem e alinhamento. Contata-se que embora exista ainda alguma dispersão dos dados, consequência de alguma variabilidade das ondas ao longo do tempo de duração do ensaio, esta é menor do que nos dados originais. Embora a rotação não seja muito grande, é possível identifica-la por comparação da nuvem de pontos original com a nuvem filtrada e rodada.

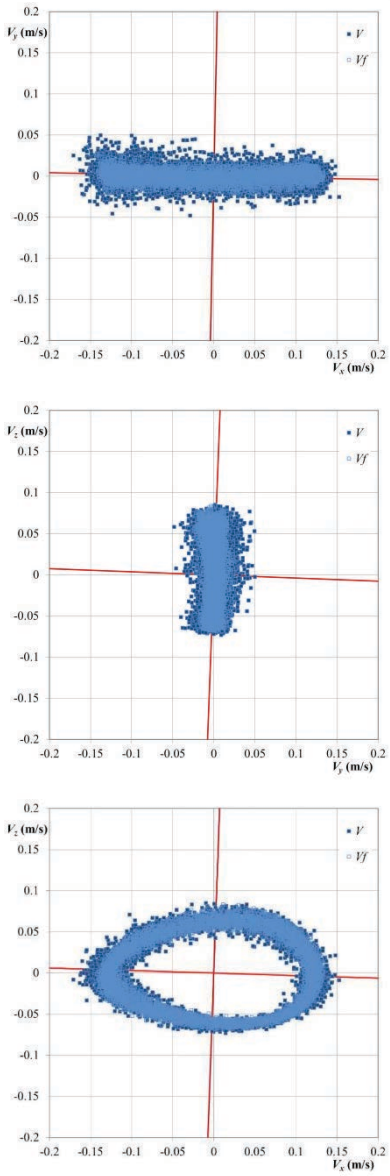


Fig. 8. Representação no diagrama hodógrafo dos valores das componentes da velocidade: V - originais; Vf - filtradas e alinhadas.

6. CONCLUSÕES

No presente artigo apresentou-se uma metodologia de análise e correção de medições de componentes de velocidade por ADV. Segundo esta metodologia faz-se primeiro uma análise espectral para identificar as frequências relevantes no fenómeno e em seguida aplica-se um filtro passa-baixo. A escolha criteriosa dos parâmetros do filtro permitem obter uma filtragem adequada, mantendo a gama de frequências relevantes e eliminando a restante.

A determinação dos vetores próprios da matriz de correlação entre as componentes de velocidade permitiu determinar a direção de propagação das ondas e deste modo identificar o desalinhamento da sonda ADV face a esta direção. A projeção das componentes de velocidade nessas direções permite eliminar esse desalinhamento nas componentes de velocidade.

Conclui-se que esta metodologia contribui para melhorar a qualidade dos resultados obtidos com medições com sondas ADV.

Agradecimentos

Os resultados experimentais apresentados foram obtidos no âmbito da licença sabática de José M. P. Conde no LNEC. Os autores agradecem: ao projeto europeu H2020-INFRA-2014-2015, N.654110 - Hydralab+ Adaptation for Climate Change; e à Fundação CAPES do Ministério da Educação do Brasil (Projeto PROCAD 053/2007) pelo financiamento das etapas da pesquisa realizadas no Brasil com recursos, equipamentos e instalações das universidades IPH/UFRGS, UNESP/Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira e UNIFEI.

REFERÊNCIAS

Capitão, R., Conde, J.M.P. (2012). Implementing the awasys wave absorption system in a peculiar wave flume. *Proc 4th International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection – Coastlab12*, Ghent, Belgium.

Conde, J.M.P., Reis, R., Fortes, C.J.E.M., Neves, D.R.C.B. (2012). Wave propagation on a flume: Physical modeling. *Engenharia Térmica (Thermal Engineering)*, Vol. 11, pp. 22-29.

Marple, S. L. (1987). *Digital Spectral Analysis: With Applications*. Prentice Hall. 492 pp.

Neves, C.F., Endres, L.A.M., Fortes, C.J.E.M., Clemente, D.S. (2012). The use of ADV in wave flumes: getting more information about waves. *Proc. 33 International Conference on Coastal Engineering*, Santander, Spain, pp. 1-15.

Neves, C.F., Endres, L.A.M. (2013). The influence of currents on wave height estimates. *Proc. 6 Short Course/Conference on Applied Coastal Research*, Lisboa, pp. 1-10.

Thompson, R.O.R.Y. (1983). Low-pass filters to suppress inertial and tidal frequencies. *Journal of Physical Oceanography*, 13:6, 1077-1083.

Marine Renewable Energy Resources Atlas for Western Iberia

F. J. Campuzano (1), M. Juliano (2), R. Fernandes (3) and R. Neves (1)

(1) MARETEC – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal. campuzanofj.maretec@tecnico.ulisboa.pt.

(2) LAMTec-ID – Universidade dos Açores, Lda. Edifícios da Marina, Apartado 64, 9760-412 Praia da Vitoria, Ilha da Terceira, Açores, Portugal.

(3) Action Modulers, Consulting and Technology, Estrada Principal, nº29 r/c, 2640-583 Paz, Mafra, Portugal.

Abstract: Marine renewable energies comprehend a vast number of technologies including tidal, waves and offshore wind technologies. Numerical modelling contributes to support the development of such activities in several ways. Through atmospheric, waves and hydrodynamic models, areas with enough energetic resources for these industries could be identified. Furthermore, operation and maintenance services rely on the sea conditions that operational modelling is able to provide through forecasts services. The forecasts of extreme events is also be valuable for the survivability of the installed devices. In this communication, the off-shore wind, waves and tidal energy potential were obtained by exploring the results of numerical models for the Western Iberia region. This work will present the main outcomes of the EnergyMare Project (Atlantic area Interreg project Contract Number: 2011-1/157). The numerical models presented have been implemented operationally and their results and forecasts can be accessed at http://forecast.maretec.org/.

Key words: western Iberia, numerical modelling, MOHID, marine renewable energies, operational modelling, resource assessment.

1. INTRODUCTION

Marine renewable energies comprehend a vast number of technologies including tidal, waves and offshore wind technologies. Numerical modelling could contribute to support the development of such activities in several ways. Through atmospheric, waves and hydrodynamic models, the areas with enough energetic resource for these industries could be identified and operation and maintenance services (O&M Services) would be performed with safer seas through forecasts services. These forecasts could also be valuable for the survivability of the installed devices as extreme events could be identified and thus possible damages could be reduced by taking measures. Moreover, operational modelling could evaluate the amount of available energy and how much would be produced by the devices thus the electric system would be more efficient in accommodating the generated energy.

In this document, the off-shore wind, waves and tidal energy potential were obtained by exploring the results of numerical models for the Western Iberia region. The document consist on a description of the numerical model applications and the calculations performed with the modelling results to evaluate each marine renewable energy along with the maps that describe each resource. The full report including the validation of the numerical models could be found at Campuzano *et al*. (2015). The numerical models presented in this document have been implemented operationally and their results and forecasts are available at http://forecast.maretec.org/.

2. METHODS

2.1. Wind Power

In order to evaluate the wind power density for the development of offshore wind projects, wind intensities and directions were analysed by numerical model forecasts for a six-year period (Jun 2009-Jun 2015). Hourly model results were obtained by a MM5 model (Meteorological Model 5; Grell *et al.*, 1994) application based in two nested grids with a horizontal resolution of 27 km and 9 km respectively implemented by the IST meteorological group (http://meteo.ist.utl.pt; Trancoso, 2012).

Wind velocity model results at 10 m height were interpolated to a 0.06 degrees regular grid. Those values were transposed to 100 m height, which is the hub height commonly used by offshore wind developers, i.e. the WindFloat pre-commercial device to be installed in northern Portugal. The wind profile of the atmospheric boundary layer, until approximate 2 km, is generally best approximated using the log wind profile equation that accounts for surface roughness and atmospheric stability by using the following equation (Equation 1):

$$u=u_r(z/z_r)^{\alpha} \qquad \text{Equation 1}$$

where u is the wind speed at height z, and u_r is the known wind speed at a reference height z_r. The α exponent is an empirically derived coefficient that varies dependent upon the stability of the

atmosphere and that according to Hsu *et al.* (1994) would have an optimum value of 0.11 for open water conditions. Replacing the values in Equation 1, wind speeds for the total period at 100 m would be obtained:

$$u_{100}=u_{10}(100/10)^{0.11}$$

With the average wind speed, the wind power density (P_{wind}) per m^2 of rotor swept area can be obtained by applying Equation 2:

$$P_{wind}= 1/2\rho|U|^3 \qquad \text{Equation 2}$$

where ρ correspond to the air density, 1.225 kgm^{-3}, and |U| is the modulus of the wind speed. Applying the formula to the 100 m height winds, the average wind power density for the six year period was obtained (Figure 1).

2.2. Wave Power

In order to model the generation, propagation and dynamics of the waves reaching the Portuguese continental coast the NOAA WAVEWATCH III (R) Model V3.14 was implemented.

In the case of the Portuguese coast, swell waves are generated in the western side of the Atlantic Ocean. To simulate the waves arriving to the Portuguese coast, three nested levels with increasing horizontal resolution -0.5, 0.25 and 0.05 degrees- covering the North Atlantic Ocean (NAt), the southwest part of Europe (SWE) and the Portuguese Continental Coast (PCC) respectively, were defined.

Two bathymetric sources were combined to populate all levels grids: the European Marine Observation and Data Network (EMODnet) Hydrography portal (http://www.emodnet-hydrography.eu) completed by the 30" resolution global bathymetry data SRTM30_PLUS (Becker *et al.*, 2009) for regions where EMODnet data were absent.

The wave energy resource was evaluated for the period 2000-2010. The NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999 with 1 degree of horizontal resolution (NCEP/NWS/NOAA/U.S. Department of Commerce, 2000) was used to feed the wave model with winds intensities and directions.

Wave power (P) in kilowatts (kW) per meter of wavefront length was estimated using the deep waters formula, valid for water depths larger than half the wavelength:

$$P = 0.49 * H_s^2 * T_m$$

where H_s correspond to the significant wave height and T_m is the average wave period. Once this formula is applied to the PCC domain for the 2000-2010 period,, it was obtained the wave power distribution for the PCC domain (Figure 2).

2.3. Tidal Power

In order to evaluate the tidal power for the Portuguese continental coast, a numerical model application was run using the MOHID Water model which is part of the MOHID Modelling System (http://www.mohid.com; Neves, 2013). MOHID is an open source numerical model programmed in ANSI FORTRAN 95 using an object orientated philosophy. This system is being developed since 1985 mainly by the MARETEC group at the Instituto Superior Técnico (IST) of the Universidade de Lisboa. The model adopted an object oriented philosophy integrating different scales and processes. The core of the model is a fully 3D hydrodynamic model which is coupled to different modules comprising water quality, atmosphere processes, discharges, oil dispersion, jet mixing zone model for point source discharges.

For this particular study, a 2-Dimensional domain covering the West Iberia region comprised by the range of latitudes (33.48N, 45.90N) and longitudes (4.20W, 13.50W) with a grid of 620x828 cells and a horizontal resolution of 0.015° (≈ 1.3 km) was set. That grid has been populated with bathymetric data derived from the EMODnet Hydrography portal. The MOHID water model was forced with the FES2012 global tide model (Carrère *et al.*, 2012) along the ocean boundary for the year 2011.

The power potential for square metre of cross-sectional area for the Portuguese Continental coast was obtained using Equation 3:

$$P= 1/2\rho|U|^3 \qquad \text{Equation 3}$$

where ρ is the density of water, 1027 kgm^{-3}, and |U| is the instantaneous current velocity (ms^{-1}). For this study the velocities used were the peak velocities associated to the spring and neap tides obtaining the Figure 3 and Figure 4 respectively.

3. RESULTS

3.1. Wind Power

Wind power shows a gradient from North to South in Western Iberia, with maximum values found in the Galicia region in Spain and decreasing landwards. In Portugal the resource appears to be relatively constant along its Western coast, while sheltered coasts in the Algarve region present the lowest values. Annual values above 200 Wm^{-2} can be found relatively close to the western Portuguese coasts. This resource presents a strong seasonality summer average power density is halve the annual value (Campuzano *et al.*, 2015).

3.2. Wave Power

Wave power distribution shows a clear gradient with a NW-SE orientation (Figure 2). Maximum values around 50 kWm^{-1} are found in the open ocean off the Northern coast while minimum values are located in the areas sheltered by geographic features

from this direction i.e. the Tagus and Sado estuarine mouths and the Algarve southern coast. On average the Portuguese coastal area has a wave power around 30 kWm^{-1} though this value would present a strong seasonality. The obtained results were in agreement with the ones obtained by Pontes *et al.* (2003). Wave density power present a strong seasonality, spring and autumn values distributions and energy values are similar while maximum are obtained during the winter period and minimum during summer periods (Campuzano *et al*., 2015).

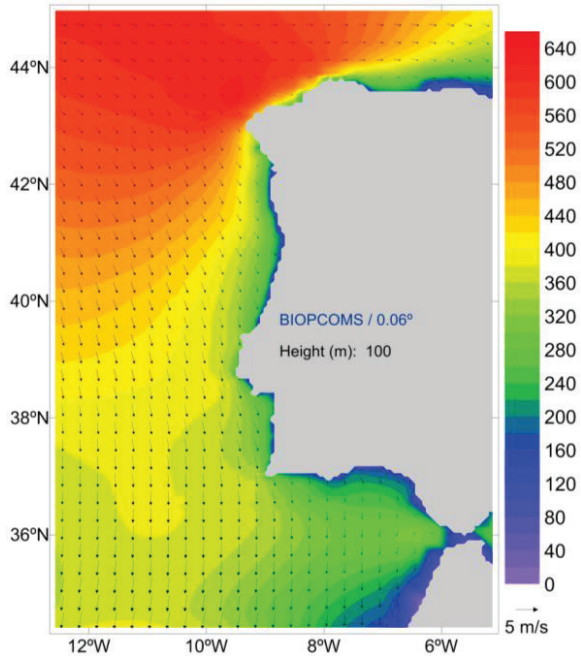


Fig. 1. Annual Mean Wind Power Density at 100 m in W/m2 for the Jun 2009-Jun 2015 period. Black arrows indicate the wind direction and intensity.

3.3. Tidal Power

Tidal power in the open ocean of the Portuguese coast is a less important marine renewable resource as peak velocities are generally under 1 ms^{-1}, even during spring tides. For that reason tidal power has been represented using a logarithmic scale (Figures 3 and 4). Maximum values due to the barotropic tide in Portugal are under 50 Wm^{-1} while in the Strait of Gibraltar region values are near 2800 Wm^{-1}.

Modelling results allow observing some of the circulation features present in Western Iberia as the Strait of Gibraltar circulation, the submarine mountains signal and the currents occurring in the Tagus Plateau in central Portugal. The latter feature has been identified as a diurnal trapped continental shelf wave (CSW) which generation is linked to the coastal bathymetry (Fortunato *et al.*, 2002; Quaresma and Pichon, 2013). The Tagus Plateau CSW would increase the currents intensities on that region influencing the peak velocities observed during spring and neap tides and their associated energy (Figures 3 and 4). In general the obtained tidal energy values are very low when compared to some locations in the UK coast with areas with higher power than 20 KWm^{-1} (ABPmer, 2008).

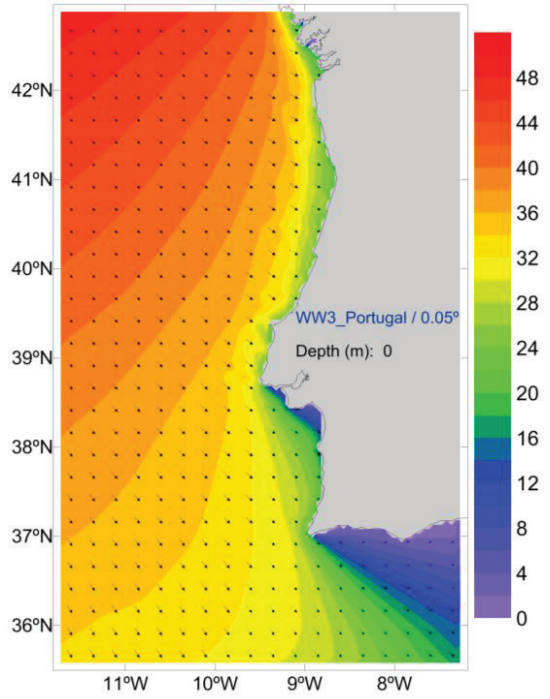


Fig. 2. Annual Mean Wave Power Density in kW/m for the 2000-2010 period. Black arrows indicate the mean wave direction.

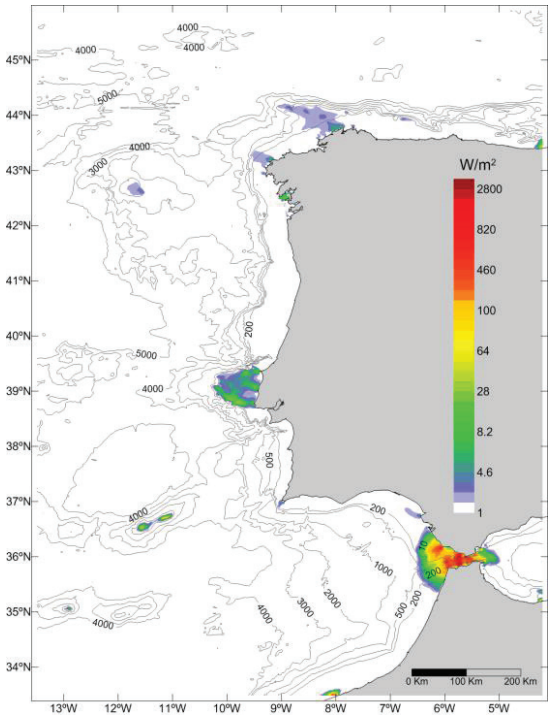


Fig. 3. Spring tidal power. Values are represented in logarithmic scale. Isobaths of 200 m, 500 m, 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m and 5000 m were added.

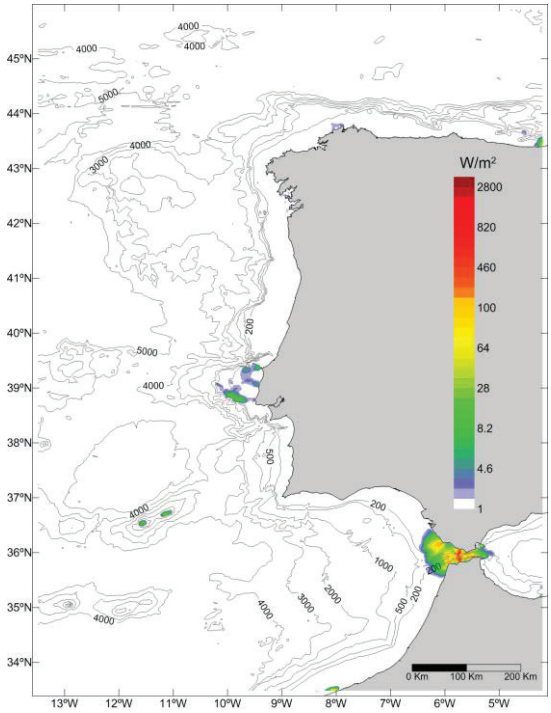


Fig. 4. Neap tidal power. Values are represented in logarithmic scale. Isobaths of 200 m, 500 m, 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m and 5000 m were added.

4. CONCLUSIONS

In this communication, we have presented a comprehensive description of the methods used and the main results of the resource evaluation of the Marine Renewable sources of Energy found in the open coasts of Portugal. This Atlas would allow to better plan, design and manage deployments of energy extracting devices and perform safer operations at sea due to numerical model forecasts. The full atlas can be found at Campuzano *et al*. (2015).

Acknowledgements

This research is a contribution for the EnergyMare project of the Atlantic Area Transnational Cooperation Programme (Project Contract Number: 2011-1/157) financed by the European Regional Development Fund (ERDF).

REFERENCES

ABPmer (2008). Atlas of UK Marine Renewable Energy Resources: Technical Report. Department for Business, Enterprise & Regulatory Reform.

Becker, J.J., Sandwell, D.T., Smith, W.H.F., Braud, J., Binder, B., Depner, J., Fabre, D., Factor, J., Ingalls, S., Kim, S-H., Ladner, R., Marks, K., Nelson, S., Pharaoh, A., Trimmer, R., Von Rosenberg, J., Wallace, G., and Weatherall, P. (2009). Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30_PLUS. *Marine Geodesy*, 32(4), 355–371.

Campuzano, F.J., Juliano, M., Fernandes, R., and Neves, R. (2015) Marine Renewable Energy Resources - Atlas for Continental Portugal. Report for the EnergyMare Project (Atlantic area Interreg project Contract Number: 2011-1/157). http://datacenter.mohid.com/EnergyMare/Marine_Renewable_Energy_Resources-Atlas_for_Continental_Portugal.pdf.

Carrère, L., Lyard, F., Cancet, M., Guillot, A., and Roblou, L. (2012). FES2012: A new global tidal model taking advantage of nearly 20 years of altimetry. *Proceedings of meeting "20 Years of Altimetry"*, Venice.

Fortunato, A.B., Pinto, L., Oliveira, A., and Ferreira, J.S. (2002). Tidally generated shelf waves off the western Iberian coast. *Continental Shelf Research*, 22, 1935–1950.

Grell, G.A., Dudhia, J., and Stauffer, D. (1994). A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Technical Note NCAR/TN-398+STR.

Hsu, S.A., Meindl, E.A., and Gilhousen, D.B. (1994). Determining the power-law wind-profile exponent under near-neutral stability conditions at sea. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 33, 757-765.

NCEP/NWS/NOAA/U.S. Department of Commerce, (2000). NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999, http://dx.doi.org/10.5065/D6M043C6, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, Colo. (Updated daily.) Accessed 11 Feb. 2015.

Neves, R. 2013. The MOHID concept. In: M. Mateus & R. Neves (eds.). *Ocean modelling for coastal management - Case studies with MOHID*. IST Press, Lisbon, 1-11.

Pontes, M.T., Aguiar, R., and Oliveira Pires, H. (2003). A Nearshore Wave Energy Atlas for Portugal. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 127(3), 249-255.

Quaresma, L.S., and Pichon, A. (2013). Modelling the barotropic tide along the West-Iberian margin. *Journal of Marine Systems*, 109–110, S3–S25.

Trancoso, A.R. (2012). Operational Modelling as a Tool in Wind Power Forecasts and Meteorological Warnings", PhD in Environmental Engineering, Instituto Superior Técnico, Lisbon Technical University.

An integrated framework for implementing operational coastal models

D. Brito (1), R. Fernandes (1) F. Braunschweig (1) S. Braunschweig (1), F. Campuzano (2) and A.R. Trancoso (3)

(1) Action Modulers, Consulting and Technology, Estrada Principal 29, 2640 Mafra. First author's email address: davidbrito@actionmodulers.com.

(2) MARETEC – Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1, 1000-049 Lisboa.

(3) MetOcean Solutions Ltd, 3/17 Nobs Line Strandon Professional Centre New Plymouth, Taranaki 4340 New Zealand.

Abstract: The process based, spatially distributed numerical models included in the MOHID Modelling System have a large spectrum of application, but its complexity poses challenges to model implementation and operationalization.
MOHID Studio (Graphical User Interface) and ACTION Server (operational service) aims to, i) ease model implementation, providing straightforward pre and post processing tools, (ii) operationalize global/regional model results downloads (e.g. GFS, Mercator), (iii) operationalize data downloads from monitoring networks (e.g. SNIRH) (iv) operationalize high resolution local model runs (e.g. MOHID, WRF) and (v) publish results via different formats (emails, RestAPI, WMS). Many of these technologies are being developed in the context of the European research projects MARPOCS and MARINER.
The work will present an example of a fully working implementation of the system in the Douro Estuary and Leixões seaport. In this place two operational models (MOHID and WRF) are implemented and a mobile friendly user interface allows to visualize the results and run on-demand simulations.

Key words: MOHID, WRF, operational modelling, port operations.

1. INTRODUCTION

MOHID Modelling System has been developed since the 80's, started as 2D model in coastal areas (Neves, 1985) and capabilities were successfully enlarged to water quality (Portela, 1996), tridimensional flows (Martins, 2000), oil dispersion, effluent dispersion, sediment transport and consolidation, resulting in a numerical model for surface water bodies (MOHID Water), which has been applied to large variety of scales and challenges (www.mohid.com).

The model capability of describing different complex systems (interaction between tide, currents, atmosphere, bottom, river input, property transport, near-field and far-field outfall and spill processes), create a high level of complexity also for the end-users, having to deal with all the model input data files, pre-processing of data (download of data, conversions to MOHID formats and to model grids) and post-processing of results.

MOHID Modelling system has a large list of publications[1], representing a mature state-of-the-art modelling reference where recent implementations focus on management driven solutions as bathing water early warning system (Viegas et al., 2012), and the development of operational systems for coastal water quality management (Fernandes et al., 2016, Fernandes et al. 2013, Brito et al., 2015, Mateus et al., 2012).

The need for alert and operational systems to take the predictive capacity of the models make it almost impossible to run such kind of system manually.

In order to overcome the complexity to operate these kind of systems ACTION MODULERS developed a set of solutions, in which MOHID plays a central role, addressed to advanced modeler and to decision makers in the water business.

One of the solution developed, ACTION Seaport, was implemented for demonstration purposes in Douro Estuary and Port of Leixões. This demo provides daily metocean forecasts and allows running passive tracers, oil spills, search & rescue on-demand simulations through a mobile friendly web interface.

2. THE MODELLING INTEGRATION FRAMEWORK

The framework that integrates external data sources and numerical models and provides user interfaces for the user is presented next.

[1]http://wiki.mohid.com/wiki/index.php?title=Mohid_Bibliography.

2.1. External Data sources

The framework can integrate data from several external data sources, such as data from monitoring networks (e.g. meteorological stations, hydrographic buoys), numerical predictions (e.g. weather forecast), static geographic layers (e.g. coastal sensitivity index) and dynamic data layers (e.g. vessel positions obtained from Automatic Identification System (AIS) – Marine Traffic[2] AIS data is seamlessly integrated with the platform).

2.2. Numerical Models

The framework allows installing different modelling tools with three main objectives: i) run numerical models for scenarios (or hindcast periods); ii) run numerical models in an operational way in order to refine the hydrodynamic / meteorological solutions obtained from global numerical predictions; (iii) perform on-demand simulations on top of operational results (using the best available hydrodynamic / meteorological conditions).

The framework contains plugins for the following numerical models: (i) MOHID Water (hydrodynamic forecast), (ii) MOHID Lagrangian (spill simulations); (iii) Weather Research and Forecasting (WRF) model (meteorological forecast); (iv) Simulating Waves Nearshore (SWAN) model (waves forecast) and (v) ACTION MODULERS in-house ship traffic emission model.

2.3. Integration Platform

The integration platform is based on ACTION MODULERS' core products: i) ACTION Server and ii) MOHID Studio. These products are supported by a central data base.

2.3.1. Action Server

ACTION Server is a window's based application server, designed to make it extremely flexible to configure and install. Current features include, among others, plugins for downloading data from monitoring networks and numerical predictions and running operational models locally, as described previously. In addition, ACTION Server allows developing, with little effort, new plugins which allow processing data from local sources (e.g. hydrographic buoys, regional meteorological forecasts).

2.3.2. MOHID Studio

MOHID Studio is ACTION MODULERS' flagship product, used by hundreds of professionals worldwide. This product is normally used to pre-process, implement, post process and validate models from the MOHID Modelling System (MOHID Water, MOHID Land. MOHID River). This product can also be used to configure models to run operationally, to configure functional modules of ACTION Server, described earlier, and to visualise all data stored by the Integration Framework.

2.4. User Interfaces

In order to facilitate the usage of the framework for non-modelling experts, ACTION MODULERS also developed a mobile friendly web interface in order to get access to most relevant information produced by the system and to perform on-demand simulations using a user friendly wizard. These interfaces use a responsive layout, so it can be used from desktop clients, tablet and smartphones.

3. TEST CASE – DOURO ESTUARY AND LEIXÕES SEAPORT

The implementation to Douro Estuary and Leixões Seaport is a demo version of the ACTION MODULERS, ACTION Seaport product that is a generic Integration Framework product designed for port operation.

3.1. Site Description

Douro Estuary is 22 km long, with the tide propagation being limited upstream by Crestuma dam. The salt penetration depends on the river flow and tidal amplitude and can only reach the dam at exceptionally low flow conditions. The estuary consists of a narrow valley, with a minimum width of 135 m at the bridge D. Luís (6 km from the mouth). Downstream of the Arrábida bridge, the estuary extends reaching the maximum width of 1300 m.

Leixões seaport, located 4km north of the estuary, is one of the larger Portuguese seaports handling per year more than 2000 ships, around 30 000 000 gross tonnages, 17 000 000 tons of goods and 400 000 containers[3]. The volume of goods handling and ship traffic asks for management tools to aid for example in operation support and emergency response actions.

3.2. Action Seaport

ACTION Seaport is an integrated and novel solution to promote intelligent monitoring and enhancement of environmental, safety and operation performance for port and shipping activities, taking advantage of the combination of state-of-the-art model-based decision support systems and data management technologies developed in ACTION MODULERS along the recent years.

In detail, ACTION Seaport can be used to support and enhance the following Port activities:

- Operation support: navigation, pilotage and (un)loading support through the visualization of high resolution forecasts of marine weather conditions, including surface currents, wave and wind data;

[2] https://www.marinetraffic.com.

[3] http://www.apdl.pt/.

- Vessel tracking: including all relevant information about vessel general characteristics (e.g. length, width, MMSI, photo), voyage (e.g. origin, destination, ETA) and real time data (e.g. position, heading, state – anchored, moored, underway);

- Emergency response: support to marine pollution tactical response through advanced and reliable on-demand oil, chemical (HNS) and inert spill forecasting, as well as simulation of the drift of floating containers and search and rescue operations;

- Port performance indicators: continuous evolution of operational port performance indicators, including time, volume and movement elements from vessels (e.g. average ship turn-round times).

The system is able to publish, distribute and interface results in multiple traditional and technological platforms, including periodic digital reports, tailor-made SMS and email alerts, mobile-friendly websites, GIS desktop systems.

The conceptual design of ACTION Seaport is shown in Figure 1. This figure shows, on the top, possible data sources and, at the right, the numerical modelling tools and on bottom the outputs of the system. In the middle the integration platform with the functional modules is shown.

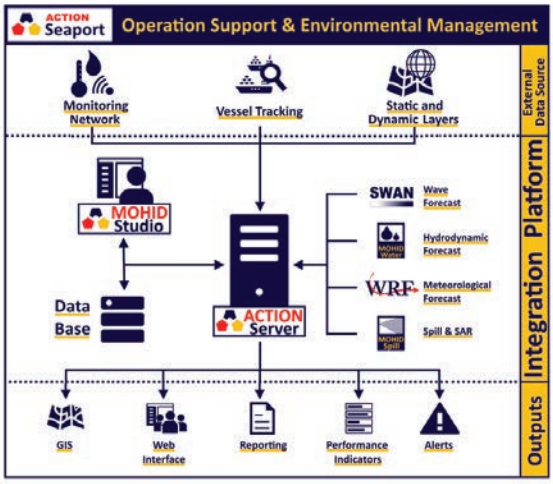


Fig.1. Conceptual design of ACTION SEAPORT.

3.3. Implementation

The specific implementation of ACTION Seaport in Douro Estuary and Leixões Seaport is a demo implementation of the system that runs operationally where:

MOHID Water model was implemented with:

- Horizontal grid with around 200x400 cells with cells of around 50x50 m
- Bathymetry obtained for the horizontal grid with Instituto Hidrográfico surveys
- Tide obtained from FES2004 global solution
- River inflow obtained from Crestuma reservoir data download (source: SNIRH[4])
- Meteorology from ACTION MODULERS WRF Portugal model implementation (9km resolution)

Vessels position are downloaded from Marine Traffic website every hour for the Portuguese Coast and coastal sensibility indexes are displayed based on Arcopol project outcomes[5].

These components are presented in demo web site (http://seaportdemo.actionmodulers.com) where forecast and historic model results are shown in form of maps and time series. Crestuma data is also presented in time series. In map format is also presented vessel positions and coastal sensitivity indexes – Figure 2.

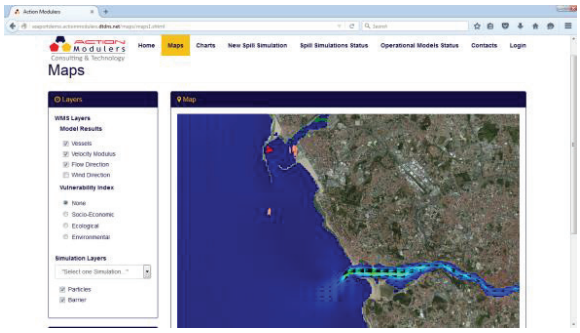


Fig. 2. Web Interface with operational model results in map display.

MOHID Lagrangian model is implemented on-demand (via the same web site) to aid on port incident response where a wizard allows to choose the type of substance (oil, passive tracer, human body), the location and date of the incident. In case of oil spills also containment barriers location can be chosen in order to test different containing approaches (Figure 3).

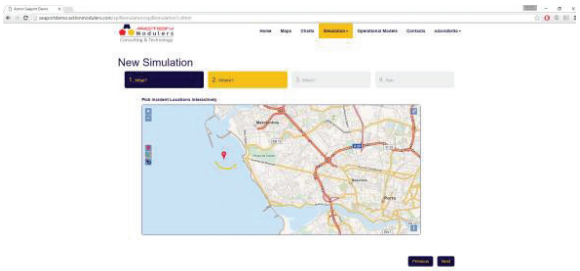


Fig. 3. Web Interface with on-demand spill simulation wizard.

The simulation is run on ACTION MODULERS server using the best hydrodynamic and meteorological forecast and after run the results can be visualized in the web interface – Figure 4.

[4] http://snirh.pt.

[5] http://arcopol.maretec.org/.

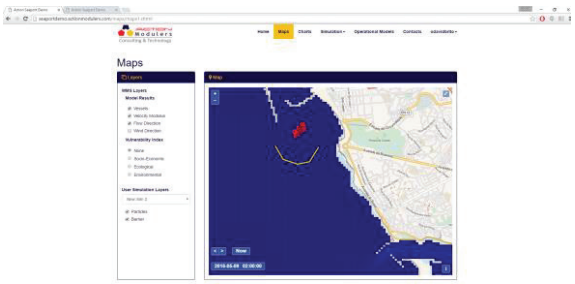


Fig. 4. Web Interface with on-demand spill simulation result.

The implementation also includes a MOHID Studio Lagrangian Wizard similar to the online version but where boundary conditions can be chosen from the available operational models (including waves) and exists an extensive database on oil substances to simulate more advanced options associated to spills.

4. CONCLUSIONS

The Modelling Integration Framework presented here allows to integrate online data (e.g. network stations, etc.), online global model results (to produce boundary conditions to local models) and local high resolution numerical models that can help both: i) the advanced modelling users in model implementation and validation, and ii) water managers in creating valuable digested information in the form of web or desktop based interfaces, reports and alerts. The framework is the basis for coastal and inland water modelling products adapted to end-users needs.

One of the Modelling Integration Framework products is ACTION Seaport that handles specifically port management where real-time vessel information from AIS (position, destination, speed, heading, navigational status, draught, load, etc.), together with operational high resolution hydrodynamic, meteorological and wave models can be used to aid for example in operation support and emergency response actions.

Acknowledgements

This work is developed under project MARPOCS (co-funded by European Union; ECHO/SUB/2015 /713854/PREP08) and MARINER (co-funded by European Union; ECHO/SUB/2015/713785/ PREP10).

The authors thank to Portuguese Maritime Authority (DGAM-SCPM) for the cooperation and support in beta testing. A special thanks to Marine Traffic for the involvement and provision of AIS data support in the scope of research and development activities within the projects scope.

REFERENCES

Brito D, Campuzano FJ, Sobrinho J, Fernandes R, Neves R. (2015) Integrating operational watershed and coastal models for the Iberian Coast: Watershed model implementation – A first approach. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2015; 167, Part A: 138-146.

Fernandes R, Braunschweig F, Lourenço F, Neves R. (2016). Combining operational models and data into a dynamic vessel risk assessment tool for coastal regions. Ocean Science. 2016; 12: 285-317.

Fernandes, R., Neves, R., Viegas, and P. C. Leitão, (2013). Integration of an oil and inert spill model in a framework for risk management of spills at sea - A case study for the Atlantic area, Proceedings on the 36th AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, Halifax, Nova Scotia, Canada. pp. 326-353, 2013.

Franz G, Pinto L, Ascione I, Mateus M, Fernandes R, Leitão P, Neves R. (2014). Modelling of cohesive sediment dynamics in tidal estuarine systems: Case study of Tagus estuary, Portugal. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2014; 151: 34–44.

Martins, F. (2000). Modelação Matemática Tridimensional de escoamentos costeiros e estuarinos usando uma abordagem de coordenada vertical genérica. Ph. D. Thesis. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa, 287 pp.

Mateus M, Riflet G, Chambel P, Fernandes L, Fernandes R, Juliano M, Campuzano F, de Pablo H, Neves R. (2012). An operational model for the West Iberian coast: products and services. Ocean Science. 2012; 8: 713-732.

Neves, R.J.J. (1985) - Étude Experimentale et Modélisation des Circulations Transitoire et Résiduelle dans l'Estuaire du Sado. Ph. D. Thesis. Univ. Liège, 371 pp.

Portela, L.I. (1996) - Modelação Matemática dos Processos Hidrodinâmicos e Qualidade da Água no estuário do Tejo. Ph. D. Thesis. Instituto Superior Técnico, Univ. Técnica de Lisboa, 240 pp.

Viegas C, Neves R, Fernandes R, Mateus M. (2012). Modelling tools to support an early alert system for bathing water quality. Environmental Engineering and Management Journal. 2012; 11(5): 907-918.

Forecasting wave propagation in littoral areas using SMARTWAVE

J. Pinto (1) and D. Mendes (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, nº 49 – 1249-093 Lisboa, paulo.pinto@hidrografico.pt.

Abstract: This study aims to develop and test a numerical model able to predict the wave propagation in littoral areas. For that end, an operational numerical model was developed. This model simulates the wave propagation in shallow waters based on the stationary version of the mild-slope equation on curvilinear grids. Also, a large field campaign was performed in June 2015 at S. Jacinto beach, NW Portugal. The measurements obtained here were used to verify the model predictions. Two disticint wave breaking formulation were also applied and are further discussed.
Comparisons between simulated and observed wave heights resulted in statistical error parameters of 0.01 m for BIAS and 0.14 for the normalized RMSE during a full tidal cycle. The computational time required for each stationary condition was 15 s with a common computer. Two distinct wave breaking formulations led to similar results which shows that wave breaking formulations are still very empirical and led to the same results after fine tuning. These evidences support the applicability of this model to provide operational forecasts of the wave propagation in littoral areas.

Key words: Operational forecast, mild-slope equation, SMARTWAVE, wave breaking formulations, coastal observatories, RAIA.

1. MOTIVATION

Forecasting wave propagation in littoral areas is important for harbour authorities, coastal management and military operations but it constitutes a challenging task. There are mainly two reasons: the temporal scales of the physical processes involved (wind-waves with periods between 4 to 14 s); and the computational effort required for operational purposes (up to an hour). For that reasons, forecast the wave propagation in littoral areas with an operational purpose is a commitment.

In terms of physical processes, the model should be capable to simulate the combined effect of wave refraction-diffraction and wave dissipation due to bottom friction and depth-induced breaking. These processes are accounted for with the use of the mild-slope equation (Berkhoff, 1976). However, this equation is usually solved in time-domain which is not suitable for operational purposes.

In terms of computational effort, the wave propagation in littoral zones is usually the last part to be simulated in an operational system. These littoral models are usually forced with boundary conditions from nested regional models. The computational time available is usually of *O*(min) to provide operational forecasts.

Yoo and O'Connor (1987) presented a wave model with an equation to account for the wave action propagation and further dissipation, and also an equation to account for wave refraction-diffraction and further interaction with ambient currents by using a transport equation for the wave number. This model seems to be a good option by solving it for stationary conditions. Also, the alternating direction implicit (ADI) scheme (Peacemen and Rachford, 1955) allows obtaining a tri-diagonal matrix which avoids more time-consuming matrix inversion methods. This numerical method besides being a good choice it lacks on mesh flexibility because it is usually applied on structured orthogonal grids.

The study presented herein has the following objectives: develop a wave model able to forecast the wave propagation in an operational way on curvilinear grids; verify this model with field observations took in a mild-slope beach; and compare two wave breaking formulations.

2. FIELD EXPERIMENT

The field experiment was performed in S. Jacinto beach. This beach is located upstream the northern jetty of the Aveiro inlet. The experiment was conducted during spring tides and the measurements covered a full tidal cycle with a tidal level ranging from 0.6 to 3.4 m. Wave conditions during the experiment ranged from low to medium energy with the significant wave height (Hs) ranging from 0.6 to 2 m. Wave periods were characterized by a narrow banded swell with peak wave periods (Tp) reaching 14 s. Wind was moderate (up to 4 m/s) and from variable directions. Several instruments were deployed in a cross-shore profile (Figure 1).

Wave conditions offshore were obtained with an acoustic Doppler current profiler (ADCP), pressure records were measured by two acoustic current meters (ACM) and eight pressure sensors (PT). The entire PTs were moored over the tidal bar thereby measuring the wave shoaling and dissipation depending on the tidal level. An in-depth analysis is provided by Mendes et al. (2015). The wave

parameters were calculated every 20 min with a spectral analysis based on the Fast Fourier Transform (FFT) with a depth-attenuation correction factor following Tucker and Pitt (2001).

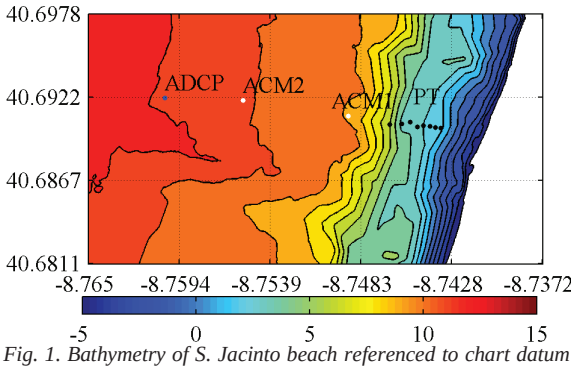


Fig. 1. Bathymetry of S. Jacinto beach referenced to chart datum (m) and location of the several instruments.

3. OPERATIONAL MODEL

3.1. Wave model

The wave model is based on the hyperbolic mild-slope equation (Dingemmans, 1997) but it was here used for stationary conditions. The governing equations can be consulted in Mendes et al. (2015).

The model was further discretized in space on a curvilinear grid that has two advantages: variable grid resolution in one direction (i.e. cross-shore); and the same boundary condition along the land-boundary segment. The disadvantage is that orthogonality must be a requirement. This model is also prepared to receive the outputs from a circulation model (i.e. currents).

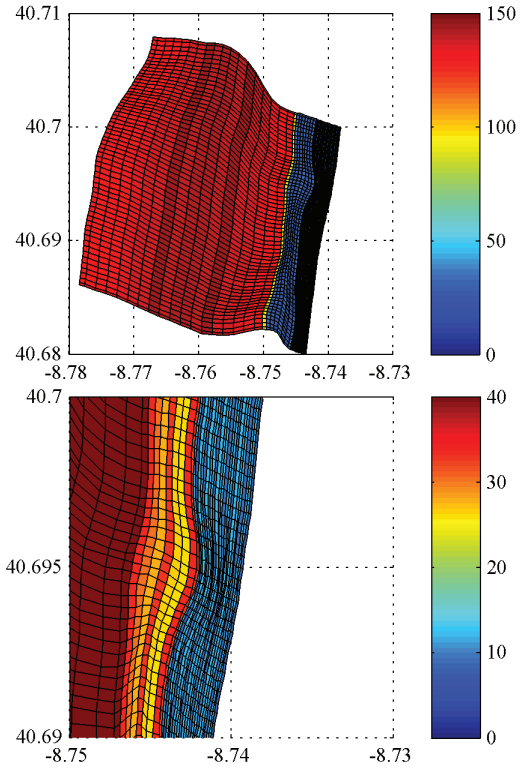


Fig. 2. Cross-shore grid resolution (m) for the all domain (top) and a detail near the coastline (bottom).

3.2. Model setup for S. Jacinto beach

The wave model was forced by the wave parameters (Hs, Tp and peak wave direction) obtained by the ADCP every 20 min from 8h00 of June 18 to 2h00 of June 19. Every 20 min, the wave model was run until it reached a stationary solution (convergence between successive time steps higher than 95%).

The wave dissipation by depth-induced breaking was computed following: (1) Baldock et al. (1998) with a γ parameter of 0.63 (hereafter B98); and (2) Roelvink (1993) with a γ parameter of 0.4 and a n parameter of 9 (hereafter R93). B98 formulation is dependent on H^2 while the R93 formulation has a dependence on H^3/h (h is the mean water depth). Also, the B98 was adjusted to stationary data while the R93 was formulated for non-stationary conditions.

Bottom friction was computed following Roelvink and Reniers (2012) with the friction coefficient obtained following Jonsson (1980). Spatial resolution was variable and it ranged from 150 m at 15 m water depth to 10 m near the coastline (Figure 2). The time-step used until the model reaches the stationary solution was 0.5 of the Courant number.

4. RESULTS

The observed and simulated Hs were compared in a dispersion plot and some statistical error parameters were also computed following Mendes et al. (2016) (Figure 3 – top). The model was capable to accurately simulate the measured data with a BIAS of -0.00 m and a NRMSE of 0.14 m after calibration. Statistical error parameters were also computed for each instrument from ACM2 to PT1 (Figure 2 – Instruments 1-10). There was an over-prediction of 0.10 m of the wave height during shoaling (Instruments 5 - 7) and a sub-estimation of 0.15 m during further breaking (Instruments 9 and 10). There was also an over-prediction of Hs at the first instrument (Figure 3 – Instrument 1). This instrument corresponds to the ACM2.

Comparison between both formulations did not show significant differences. The statistical error parameters had almost the same values. The same pattern was also observed over the instruments with an over-prediction at instrument 6 and sub-prediction at instrument 1.

Computational time was ~700 s for the 54 runs simulated (every 20 min). This allows providing forecasts of the wave propagation in 15 s using an Intel Pentium(R) 3.00 GHz and 8 Gb RAM memory.

5. DISCUSSION

The statistical error parameters calculated were in line with other wave propagation studies in littoral areas (i.e. Dodet et al., 2013). In terms of Hs, the model accurately reproduced the observed values during a full tidal cycle from 10 to 3 m water depth.

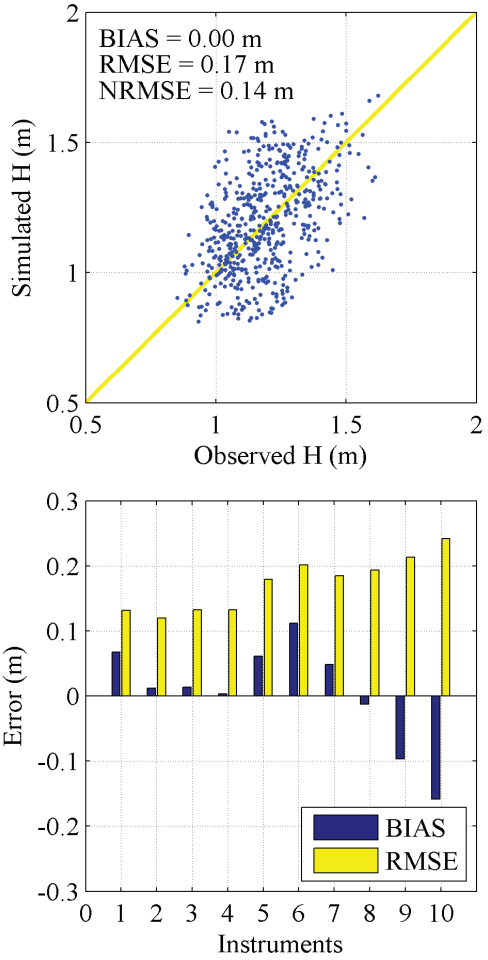


Fig. 3. Dispersion plot for significant wave height (top), statistical error parameters and the bar plot with statistical error parameters for each equipment (bottom) using the Baldock et al. (1998) wave breaking formulation.

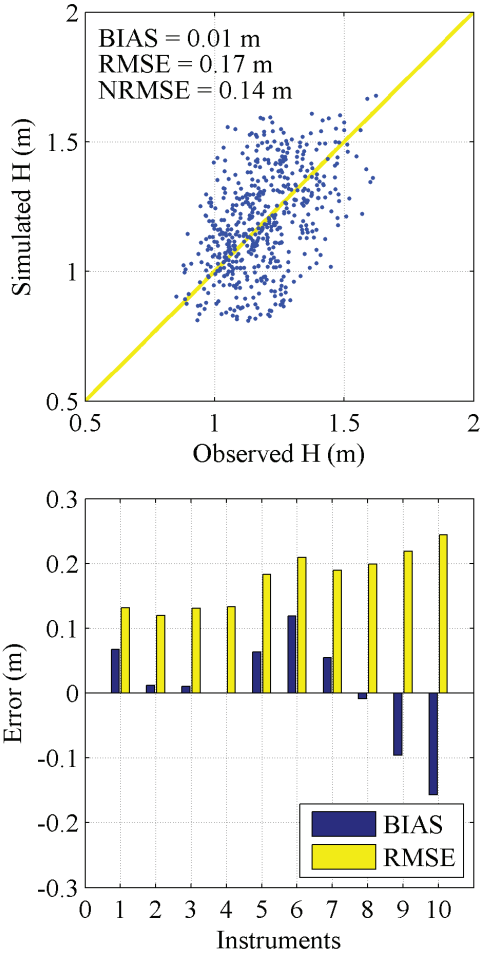


Fig. 4. Dispersion plot for significant wave height (top), statistical error parameters and the bar plot with statistical error parameters for each equipment (bottom) using the Roelvink. (1993) wave breaking formulation.

Besides being small, the largest errors occurred during the shoaling and further dissipation. There was a systematic error at ACM2 which may be related to the estimating method of the Hs. At the open boundary, Hs was estimated based on the ADCP's software. At all the other instruments, Hs was calculated based on the spectral analysis already described in Section 2. These differences might be important and were explored by Costa et al. (2016).

Results of the wave breaking formulation - B98 were very similar to R93. After fine tuning of these formulations, one will have the same results. This supports the idea that wave breaking dissipation formulations are still very empirical. Even if the formulations were obtained for different type of conditions.

In terms of computational time, the simulations were surprisingly fast: 15 s for each stationary condition. The implementation of the curvilinear grid allowed reducing the number of grid elements with variable cross-shore distance. This implementation was a step forward compared to the previous studies (Mendes et al., 2015) in terms of operational purposes.

Overall, the statistical error parameters obtained were good and the computational time required for the simulations is the needed for operational forecasting purposes. Future applications should verify the wave-induced currents by coupling this wave model with a circulation model.

6. CONCLUSIONS

A wave propagation model was developed and verified against field measurements. The model proofed to be applicable to littoral environments due to the BIAS of 0.00 m in the Hs and the NRMSE of 0.14 after a detailed calibration. Both wave dissipation formulations led to the same results after calibration. The computational time required for these simulations was also the needed for operational purposes. Therefore, this model can provide operational wave forecasts in littoral areas to be used by harbour authorities, general public and military operations.

Acknowledgements

Thanks are due to all the people that contributed to and participated in the field campaign. This research is a contribution to project RAIA.CO

(0520\RAIA\CO\1\E), Observatório Marinho da Margem Ibérica e Litoral, funded by the European Fund for Regional Development (EFDR) through the Programa Operacional de Cooperação Transfonteiriça Espanha-Portugal (POCTEC).

REFERENCES

Baldock, T. E., Holmes, P., Bunker, S., & Van Weert, P. (1998). Cross-shore hydrodynamics within an unsaturated surf zone. *Coastal Engineering*, 34(3), 173-196.

Berkhoff, J. C. W. (1976). *Mathematical models for simple harmonic linear water waves: wave diffraction and refraction*. PhD Thesis. Delft University. 110pp.

Costa, N., Mendes, D., Boto das Neves, B. and Jorge da Silva, A. (2016) Observações de processos litorais: casos de estudo de S. Jacinto e Gelfa. *4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica* (this volume).

Dingemans, M. (1997). *Water Wave Propagation over Uneven Bottoms*. World Scientific. 963 pp.

Dodet, G., Bertin, X., Bruneau, N., Fortunato, A. B., Nahon, A., & Roland, A. (2013). Wave-current interactions in a wave-dominated tidal inlet. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(3), 1587-1605.

Jonsson, I. G. (1980). A new approach to oscillatory rough turbulent boundary layers. *Ocean Engineering*, 7(1), 109-152.

Mendes, D., Fortunato, A.B., Pires-Silva, A.A. (2016). Assessment of three dredging plans for a wave-dominated inlet. *ICE Proceedings – Maritime Engineering*, (Ahead of print).

Mendes, D., Pinto, J. P. and Jorge da Silva, A. (2015). Application of an operational model to forecast near-shore circulation: the case study of S. Jacinto beach. *Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia (CNCG15) – Ordem dos Engenheiros*. Academia Militar, 29 e 30 de Outubro 2015, Lisboa.

Peaceman, D. W., and Rachford, Jr, H. H. (1955). The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 3(1), 28-41.

Roelvink, D. & Reniers, A. (2012). *A Guide to Modelling Coastal Morphology*. World Scientific. 274 pp.

Roelvink, D. (1993). Dissipation in random wave groups incident on a beach. *Coastal Engineering*, 19(1), 127-150.

Tucker, M. J., and Pitt, E. G. (2001). *Waves in Ocean Engineering*. Elsevier. 550pp.

Yoo, D., & O'Connor, B. A. (1986). Mathematical Modelling of Wave-Induced Nearshore Circulations. In *Proceedings of 20th Conference on Coastal Engineering*, Taiwan, 1667-1681.

Assessing the impact of meteorological models in coastal and estuarine surface drift forecasting systems

R. Fernandes (1), D. Brito (1), F. Braunschweig (1), A.R. Trancoso (2) and F. Campuzano (3)

(1) Action Modulers, Consulting and Technology, Estrada Principal 29, 2640 Mafra. rodrigo.fernandes@actionmodulers.com.

(2) MetOcean Solutions Ltd, 3/17 Nobs Line Strandon Professional Centre New Plymouth, Taranaki 4340 New Zealand.

(3) MARETEC – Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1, 1000-049 Lisboa.

Abstract: The implementation of ocean and coastal operational systems is now relatively accessible to the scientific community. Although estuary modelling is more challenging than coastal processes in specific processes, operational and pre-operational implementations tend to integrate high resolution hydrodynamic models, but sometimes forced with sea surface boundary conditions from low resolution atmospheric models. This approach may result in biased forecasts, especially when modelling the transport of floating objects or substances. This work compares results obtained from the simulation of sea surface lagrangian trajectories under the combined forcing of the same hydrodynamic model data but with meteorological models of different spatial resolutions. The lagrangian modelling results are generated based on a user interface using MOHID model, and specifically designed to provide fast, easy-to-use and reliable lagrangian forecasts seamless integrated with metocean data. The obtained results for the Lisbon region indicate that simply passing from 9km to 3 km spatial atmospheric model resolution in nearshore areas or inside the estuary, can result in distinct trajectories from floating substances or objects, in more than 10 km in less than 48 hours. In offshore applications, there is no particular advantage in implementing high resolution atmospheric models, although using low resolution (e.g. GFS 27km) can generate differences of 5 km after 48 hours.

Keywords: MOHID, lagrangian, estuaries, meteorological models, hydrodynamics.

1. INTRODUCTION

The increasing operational computational and operational capacity for building and maintaining high resolution hydrodynamic models is a strong advancement for a better support on multiple activities, including management of beach water quality, prevention and response to marine accidental pollution, navigational aid, etc.

When implementing these kind of systems, particularly in forecasting systems, it is not uncommon to find a huge gap between the spatial resolutions of the hydrodynamic models and their atmospheric boundary conditions. Some cases take in consideration hydrodynamic models with 100m spatial step or even less, under atmospheric boundary conditions resulting from operational atmospheric models with 9-12km spatial resolution.

Thus some pertinent questions may arise: what is the relevance of the atmospheric forcing resolutions in these modelling systems? Is there any particular advantage of having a huge hydrodynamic horizontal (and vertical) spatial discretization when the ingested atmospheric models are not even able to differentiate a Port from an entire city, or an island from the open sea?

Action Modulers is presently involved in multiple activities and research projects (MARINER, MARPOCS) regarding national and transnational integrated metocean modelling implementation, and development of associated downstream services and decision support systems for Port operations and National Marine Pollution Response services (*Action Seaport*). Thus, finding concrete answers to some of these questions might be relevant in order to properly implement an efficient modelling framework.

In order to find answers to some of these questions, the work here presented tries to assess the influence of different atmospheric model resolutions in a hydrodynamic model, and particular on surface currents and on the transport / trajectory of floating objects or substances.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Area of study

Since this work is mainly focussed on the impact of atmospheric models in coastal and estuarine drift forecasting systems, the Lisbon region + Tagus estuary was selected. This coastal area includes an important Port (Port of Lisbon) with intense maritime traffic (including tankers – see Fig. 1),

surrounded by the most urbanized region in Portugal (more than 2.5 million people leave in both estuarine margins), with important bathing waters, touristic activities and the closeness of Sintra Mountains (about 16 km extension). Both urbanized areas and Sintra Mountains may influence the atmospheric regime in the coastal and estuarine waters, due to the effect on topography roughness. The main source of freshwater into the estuary is the Tagus River, with flow rates varying typically between 50 and 2000 m3 s -1.



Fig. 1. Tankers density in the Lisbon region (MarineTraffic).

2.1. Models used

The proper development of this study is supported by implemented metocean and lagrangian modelling applications in the area of study, making use of widely used open-source modelling software.

Different atmospheric models, with different resolutions, are used as surface boundary / forcing conditions for the same hydrodynamic and oil spill models. The expected differences in results, are only due to these atmospheric models, since all the other configurations are kept constant between simulations.

2.1.1 Atmospheric models

3 different model configurations, with different resolutions, were considered in the scope of this work. The coarser model considered is the widely used NOAA's Global Forecasting System (GFS), namely, the near-real time solution with a 0.25º spatial step (approx. 27 km at Lisbon latitude).

Using a nested downscaling modelling approach, 2 different forecasting systems were recently implemented by Action Modulers, using WRF (http://www.wrf-model.org/) open-source modelling software. Both cover continental Portugal, with the first level having 9km spatial resolution, and the second one with 3 km. The first level uses GFS as lateral boundary conditions, while the second level (3km) is nested in the first one. Both have 30 vertical layers, and a time step of 60 seconds in WRF-9km and 20 seconds in WRF-3km.

The management, control and automatic operation of WRF models is fully integrated in Action Modulers's Action Server software solution. These model implementations are presently being used by Action Modulers to different direct and indirect purposes, including the support of flood early warning systems or boundary conditions to coastal models.

2.1.1 Hydrodynamic model

The hydrodynamic model solution considered for this study is the Tagus mouth operational model, implemented, validated and used by MARETEC-IST since 2005 (Fernandes, 2005; Campuzano et al, 2012; Ascione Kenov et al, 2014) in the scope of multiple projects (e.g. EASYCO, LENVIS, DRIFTER, ARCOPOL, etc.), exercises with authorities, and monitoring programs (SANEST). This model is running in a full 3D baroclinic mode with a variable horizontal resolution ranging from 2 km to 300 m around the estuary mouth. The vertical discretisation consists in 50 vertical levels with a resolution close to 1 m near the surface.

Since this assessment is only focused in the transport of floating substances, only the surface hydrodynamic vertical layer will be taken into account when analysing the results.

The numerical software used for this model application is MOHID modelling suite (www.mohid.com), which is a public-domain open-source system.

2.1.1 Lagrangian transport model / oil spill model

An oil spill trajectory model was used, in order to evaluate the distinct drift results when using different atmospheric model resolutions (and also different surface currents, which are also influenced by the atmosphere). The oil spill model used is integrated in lagrangian component of MOHID, and has been widely used and validated in oil spill applications, exercises and real situations across the world, allowing the simulation of all major oil transport and weathering processes at sea (Fernandes, et al., 2013). In this work, all the oil vertical processes and weathering processes are excluded, except the mechanical spreading, which has direct influence on the horizontal evolution of the floating pollutants. Wave-driven velocity (Stokes drift) and a wind-drag coefficient of 3% are also included. The simulated substance is a medium oil (*Carpinteria*), and 100 particles are instantly released in each origin.

3. RESULTS

3.1 Atmospheric models performance

Prior to the application and analysis of the influence of meteorological solutions in the hydrodynamic models and the transport of floating objects or substances, a brief comparison and statistical analysis of the meteorological models and different meteorological stations was conducted. These

stations are publicly available through Weather Underground (www.wunderground.com). Nine stations covering the area of study were selected (see Fig. 2, left side), and 1 one-week time period (covering the days used for hydrodynamic and lagrangian model simulations used in this paper) was considered.

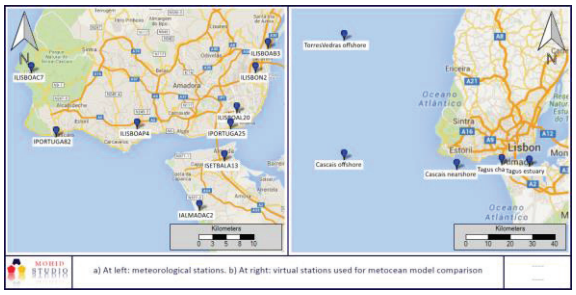


Fig. 2. Location of meteorological stations used for validation (left) and selected points for hydrodynamic analysis (right).

The statistical analysis for wind speed is presented in Table I. Air temperature and wind directions were also evaluated. As can be seen, WRF generally presents better results than the WRF 9km, and this one, better than GFS (27km). In some stations, model performances are clearly influence by important topographic accidents, like for instance, the station *ILISBOAC7*, located in Sintra Mountains. It can also be seen that meteorological models tend to overestimate the wind speed, especially when they have lower spatial resolution. This is the result of having smoother and lower detailed topographies.

Table I. Statistics of meteorological model performance for wind speed in multiple stations (25 April – 1 May 2016).

Wind speed (m/s)		Stations									
		IALMADAC2	ILISBOAB3	ILISBOAC7	ILISBOAL20	ILISBOAP4	ILISBON2	IPORTUGA25	IPORTUGA82	ISETBAL413	All data
Measured data	Mean	3.08	1.45	1.11	2.08	5.49	3.65	3.63	2.25	2.12	**2.77**
	Sddev	2.07	0.95	0.90	0.87	2.51	1.79	1.76	2.45	1.46	**2.16**
WRF 3km	Mean	3.81	3.95	5.02	3.72	4.53	3.65	3.50	5.47	3.72	**4.13**
	Sddev	2.25	1.97	1.74	2.14	2.29	1.57	1.85	2.44	2.14	**2.15**
	MAE	1.23	2.67	4.06	1.81	1.48	1.17	1.08	3.22	1.82	**2.02**
	RMSE	1.58	3.18	4.30	2.43	1.90	1.49	1.40	3.54	2.50	**2.69**
	MB	-0.73	-2.49	-3.92	-1.64	0.96	-0.01	0.13	-3.22	-1.60	**-1.37**
WRF 9km	Mean	5.11	3.98	4.65	3.72	4.61	3.95	3.72	4.95	3.72	**4.25**
	Sddev	2.00	1.76	1.61	1.93	2.00	1.77	1.93	1.85	1.93	**1.94**
	MAE	2.37	2.70	3.68	1.79	1.32	1.31	1.44	2.71	1.98	**2.11**
	RMSE	2.10	3.70	6.16	2.61	2.74	1.17	2.86	2.98	2.51	**2.69**
	MB	-2.03	-2.53	-3.54	-1.64	0.88	-0.31	-0.09	-2.70	-1.60	**-1.49**
GFS	Mean	5.65	4.06	6.48	3.90	3.90	4.06	3.90	6.43	3.90	**4.70**
	Sddev	2.02	1.79	2.31	1.64	1.64	1.77	1.64	2.40	1.64	**2.17**
	MAE	2.69	2.72	5.52	1.90	1.73	1.45	1.00	4.16	1.89	**2.54**
	RMSE	3.15	3.04	5.84	2.19	2.10	1.77	1.28	4.38	2.17	**3.25**
	MB	-2.57	-2.61	-5.37	-1.83	1.58	-0.41	-0.27	-4.18	-1.79	**-1.93**

3.1 Impact on surface currents: integrated hodograph

In order to assess the influence of the different meteorological models in the surface hydrodynamics, 5 different virtual stations were defined, and time series were extracted from those points, with the hourly modelled surface current velocities for a 72-hour period between 28-4-2016 00:00 and 1-5-2016 00:00. These velocities were then integrated under integrated hodographs, and the results for 4 of those points are presented in Fig. 3.

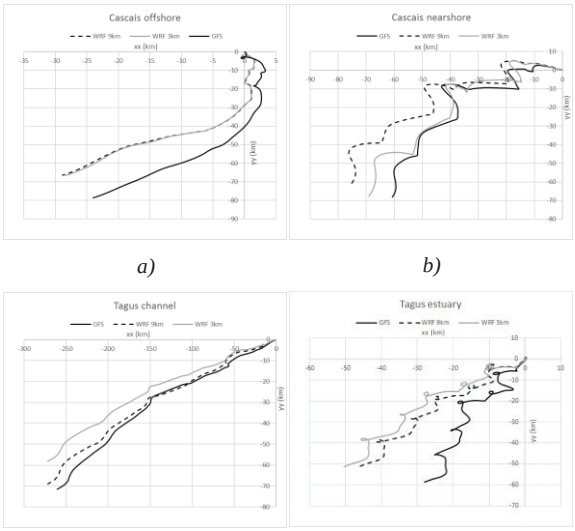


Fig. 3. Integrated hodographs under different meteorological forcing and different locations: a) Cascais offshore; b) Cascais nearshore; c) Tagus channel; d) Tagus estuary.

First of all, the surface currents obtained with GFS are significantly different from the other WRF model results (can reach 20 km after 3 days), except for the Tagus channel, where the tidal currents are very strong and dominant over the other forces. Second: somehow, even off the coast (Cascais offshore, and Torres Vedras offshore – hodograph not presented here, but similar to Cascais offshore virtual station), the WRF models results can differ from GFS – although velocities are quite similar between the two WRF model resolutions. Third, in Cascais nearshore virtual station, results from WRF 9km and WRF 3km can be significantly different (more than 10 km), due to the influence of the Sintra Mountains, better discretized in WRF 3km meteorological model. Just a last note to the directions obtained in Tagus channel – there is no movement towards east (even in high tides), mainly because the analysed time period is during low tide (low barotropic tidal velocities) and high downstream velocities induced by a strong Tagus river flow.

3.2 Impact of surface transport of floating objects or substances: lagrangian trajectories

Different lagrangian surface drift / oil spill model simulations (with weathering processes and vertical movements turned off) were conducted in different locations, and for a simulation period of 48 hours, between 28-4-2016 00:00 and 28-4-2016 00:00.

Centre-of-mass integrated trajectories from the released 100 lagrangian particles are computed, and presented in Fig. 4. These results were visualized and partially generated with MOHID Studio's Lagrangian Spill wizard plugin, allowing to easily generate and visualize on-demand lagrangian simulations.

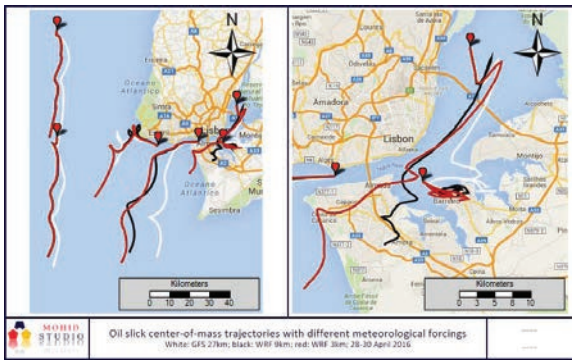


Fig. 4. Oil slick centre of mass trajectories at different release points (red placemarks), under different meteorological forcing: GFS – white; WRF 9km – black; WRF 3km – red.

The centre of mass can indeed be quite different under distinct meteorological model resolutions, particularly in the Tagus Mouth, Tagus estuary, and close to the coast. In these cases, differences greater than 10km in centre of mass trajectories can be found, in only 48 hours. In the other hand, the particle trajectories obtained from WRF-9km and WRF-3km forcing are quite similar in the offshore (by the Figure, the trajectories are almost overlapped), and thus, in these offshore areas, the results obtained seem to reduce the relevance of having high resolution offshore models; nevertheless, a low resolution model (GFS – 27km) presents a different trajectory (equal or less than 5 km of difference), meaning that even in these cases, GFS (or other low resolution models) should only be used as a last resource solution.

4. FINAL REMARKS

The work presented here fully integrates the Action Modulers strategy of improving metocean and marine pollution forecasting systems through the implementation of holistic modelling systems and novel decision support systems in multiple areas of application, and in the case of this work, particularly in coastal and estuarine areas. However, the development of high resolution metocean models must be properly analysed and adequately defined, in order to respond to the actual needs, and to find a good compromise between what is expected in terms of reliability and quality of results, and the computational time and human resources required. Having high resolution hydrodynamic models in some coastal and estuarine areas without a proper high resolution atmospheric forcing can represent an increase the costs without a specific benefit for the certain end users.

The quantitative relevance of wave modelling in the hydrodynamic and lagrangian transport in the studied coastal areas was not considered in this study, and should be pursued in the future.

Further meteorological validation will be conducted in the future for different areas and different parameters, as well as the implementation of higher resolution models, when needed (e.g. flash flood events require very high spatial and time resolution models in order to properly represent precipitation), in parallel with the development of operational services for disseminating meteorological forecasts (*Action Weather*).

Acknowledgements

This work is developed under project MARPOCS (co-funded by European Union; ECHO/SUB/2015/713854/PREP08) and MARINER (co-funded by European Union; ECHO/SUB/2015/713785/PREP10).

REFERENCES

Ascione Kenov I, Campuzano F, Franz G, Fernandes R, Viegas C, Sobrinho J, de Pablo H, Amaral A, Pinto L, Mateus M, Neves R (2014). Advances in Modeling of Water Quality in Estuaries, in: Finkl, C.W., Makowski, C. (Eds.), *Remote Sensing and Modeling.* Springer International Publishing, pp. 237-276.

Campuzano, F., Fernandes, F., Leitão, P., Viegas, C., de Pablo, H. and Neves, R. (2012). Implementing local operational models based on an offline downscaling technique: The Tagus estuary case, 2ªs Jornadas da Engenharia Hidrográfica, Lisbon.

Fernandes, R. (2005). Modelação Operacional do Estuário do Tejo. MSc. Thesis. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.

Fernandes, R., Neves, R., Viegas, C. and Leitão, P. (2013). Integration of an oil and inert spill model in a framework for risk management of spills at sea - A case study for the Atlantic area, Proceedings on the 36th AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, Halifax, Nova Scotia, Canada. pp. 326-353.

Plataforma integrada WebSIG para apoio à gestão da emergência em eventos de inundação em estuários

A. Oliveira (1), J. Rogeiro (1), J.L. Gomes (2), P. Pinto (2), A. B. Fortunato (3), P. Freire (3), R. T. Costa (3), L. Sá (4), R. Pablo (5) e A. Mendes (1)

(1) Grupo de Tecnologias da Informação em Água e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, aoliveira@lnec.pt.

(2) Previamente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

(3) Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

(4) Autoridade Nacional de Proteção Civil.

(5) Câmara Municipal do Seixal.

Resumo: A inundação das margens estuarinas deve-se normalmente a condições meteo-oceanográficas extremas, nomeadamente níveis elevados de maré, grandes descargas fluviais e tempestades marítimas. Muitas cidades localizam-se em margens estuarinas, estando assim vulneráveis a inundações, problema que é agravado pelas alterações climáticas. Para apoiar a gestão do risco e da resposta a estes eventos, desenvolveu-se uma plataforma WebGIS inovadora, e aplicou-se ao estuário do Tejo. Esta plataforma disponibiliza alertas baseados em previsões em tempo real dos processos relevantes, devidamente aferidas com dados em tempo real. A plataforma foi concebida para os agentes de proteção civil, desde os operacionais até às estruturas de gestão. Providencia em particular: 1) diferentes níveis de detalhe e modos de representação da inundação estuarina; 2) resultados específicos das previsões em pontos críticos da margem; 3) diferentes boletins de alerta para escalas espaciais distintas; e 4) acesso rápido e georreferenciado à informação através de uma única interface. Esta comunicação apresenta esta plataforma e a sua aplicação ao estuário do Tejo.

Palavras-chave: Inundação, sistema de alerta, previsão em tempo real, plataforma WebGIS.

1. INTRODUÇÃO

Muitas zonas costeiras têm um risco elevado de inundação e galgamento. Estão localizadas frequentemente em cotas altimétricas baixas, expostas à ação do mar, nomeadamente às variações do nível da água devido às marés, sobre-elevações de origem meteorológica e agitação marítima. São ainda em geral zonas densamente povoadas, particularmente vulneráveis a eventos extremos. Várias inundações recentes com consequências catastróficas, como o furacão Katrina em 2005 e a tempestade Xynthia em 2010, têm motivado o desenvolvimento de instrumentos que permitam prever estes eventos extremos com antecedência, por forma a acionar mecanismos de proteção de pessoas e bens e reduzir as suas consequências. Por exemplo, a tempestade Hércules em 2014 causou prejuízos estimados em 21 milhões de euros em Portugal (jornal Expresso, 31/1/2014).

Os sistemas de previsão em tempo real produzem previsões a escalas de tempo curtas (dias), através da integração de modelos numéricos e dados de campo. São hoje ferramentas habituais de suporte à gestão costeira e portuária para análise de grandezas como a agitação marítima, e os níveis e velocidades da água. A necessidade de prever de forma quantitativa os eventos extremos motivou o desenvolvimento pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de um sistema de previsão de níveis do mar extremos na costa Portuguesa. Estas previsões são feitas a escalas regionais, que excedem o território nacional. Os resultados são usados para forçar modelos locais, de alta resolução, que permitem prever os níveis junto à costa ou no interior de estuários.

O desenvolvimento recente dos sistemas de informação tem conduzido a uma mudança de paradigma na previsão, deteção e alerta de eventos de risco. Estas tarefas são crescentemente asseguradas por sistemas automáticos, suportados por interfaces *web* que permitem aceder a toda a informação relevante para a gestão do risco e da emergência. Estas interfaces oferecem ainda a possibilidade de interatividade com o utilizador (p. ex., pesquisa de resultados da previsão em locais escolhidos pelo utilizador, simulações a pedido ou carregamento de informação dos agentes de proteção civil no terreno para análise integrada dos eventos). Esta comunicação tem por objetivo apresentar uma plataforma WebGIS inovadora para apoio à gestão do risco e à resposta à emergência de inundação, que integra produtos de previsão em tempo real e alerta, assim como os resultados de uma análise de risco detalhada, tendo como caso de aplicação o estuário do Tejo.

2. SISTEMA OPERACIONAL DO LNEC (WIFF): DESCRIÇÃO E APLICAÇÃO

2.1. O sistema WIFF

O sistema de previsão em tempo real utilizado está integrado na plataforma WIFF – *Water Information Forecast Framework* (Oliveira et al., 2014), uma plataforma genérica, adaptável a qualquer localização geográfica desenvolvida no LNEC para aplicações oceânicas, costeiras e suas interfaces urbanas. Integra um conjunto de modelos numéricos que corre diariamente em ambientes de elevada performance (Oliveira *et al.*, 2015). A plataforma WIFF foi desenvolvida para simular processos físicos, tendo sido alargada à qualidade da água.

A qualidade e a robustez das previsões são essenciais para a fiabilidade destes sistemas. Cada aplicação da WIFF é validada automaticamente por comparação com os dados disponíveis *online* em tempo real, permitindo aos utilizadores aferirem de forma independente a qualidade dos resultados. A disponibilidade atempada das previsões é outro requisito dos sistemas de previsão. O LNEC opera as várias aplicações do sistema de previsão de forma redundante utilizando várias estações de trabalho e nós do *cluster* MEDUSA (integrado na Infraestrutura Nacional de Computação Distribuída – INCD, Oliveira *et al.*, 2015). As interrupções do serviço são minoradas através do controle automático da adequação e qualidade dos forçamentos dos modelos.

2.2. Aplicação à inundação oceânica e estuarina

A aplicação da WIFF apresentada prevê os níveis extremos na costa Portuguesa e no estuário do Tejo (Figura 1). Diariamente, este sistema simula a agitação marítima e os níveis do mar devidos à maré, vento e pressão atmosférica para 48 horas, a escalas regionais. Os resultados são usados para forçar o modelo local, de alta resolução, dos níveis no estuário do Tejo, através da simulação acoplada da circulação e da agitação marítima.

Para a previsão regional da agitação, os campos de ondas são gerados com o modelo espectral de ondas de terceira geração WAVEWATCH III (Tolman, 2009). O domínio utilizado cobre o Atlântico Norte, com uma resolução de 0.5º, seguida de malha encaixada com uma resolução de 0.05º para a plataforma continental Portuguesa. O espectro de ondas é dividido em 24 direções e 25 frequências, (Dodet *et al.*, 2010). As simulações são forçadas com campos de vento provenientes das previsões do Global Forecast System (GFS). Esta aplicação está operacional desde 2011, produzindo diariamente previsões que são comparadas de forma automática com os dados *online* de agitação marítima das boias da costa Portuguesa: Leixões, Lisboa, Sines e Faro. A precisão destas previsões foi avaliada usando o portfolio do LNEC de vários anos de previsões em tempo real para a costa portuguesa da agitação marítima, de modo a aferir a sua qualidade, por comparação com os dados nesse período. Esta análise foi feita através de erros quadráticos médios (EQM) para um período entre 2011 e 2015. Os resultados mostram o excelente desempenho do modelo na costa oeste de Portugal (Leixões, Lisboa e Sines), onde os erros são da ordem de grandeza de modelos de *hindcast* (Hs da ordem dos 30 cm, Dodet *et al.*, 2012). Na costa sul os erros são mais relevantes e, em particular, as alturas significativas das ondas são frequentemente subestimadas devido à baixa resolução do campo de ventos. Mais detalhes são dados em Fortunato *et al.* (2015).

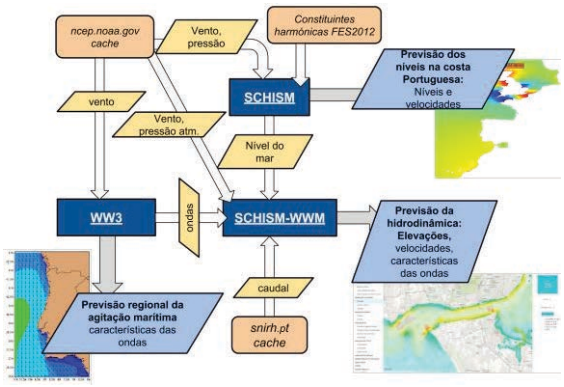


Fig. 1. Workflow operacional do sistema de previsão do projeto MOLINES (adaptado de Fortunato et al., 2015).

As simulações regionais do nível do mar são realizadas com o sistema de modelação SCHISM (Zhang *et al.*, 2016). É um sistema de código aberto totalmente paralelizado para a simulação tridimensional baroclínica a escalas que vão do rio ao oceano. Utiliza malhas não estruturadas, métodos semi-implícitos de elementos e volumes finitos combinados com algoritmos Eulerianos-Lagrangianos para resolver as equações de águas pouco profundas. O SCHISM foi aplicado numa parte significativa do Atlântico Nordeste, forçado nas fronteiras pelo modelo global de maré FES2012 (ftp.legos.obs-mip.fr) e pelo efeito do barómetro inverso, e pelo potencial de maré, pela pressão atmosférica e pelo vento no interior do domínio. A malha é bastante fina na costa Portuguesa, com valores médios de 250 m. Este modelo está operacional desde março de 2015, tendo as suas previsões de março a maio de 2015 sido comparadas com medições em vários marégrafos em Portugal, Espanha e França (plataforma EMODNET - http://www.emodnet-physics.eu/Portal). Os EQM são da ordem de 5 cm ao longo da costa portuguesa. Fortunato *et al.* (2015) apresenta mais detalhes desta análise.

A hidrodinâmica no estuário do Tejo é simulada com o modelo SCHISM-WWMII (Roland *et al.*, 2012) que faz o acoplamento entre o modelo de circulação SCHISM e o modelo espectral de ondas WWM. O modelo de circulação fornece os níveis e as velocidades, e recebe os gradientes das tensões de radiação. O domínio de cálculo estende-se desde a

zona costeira até Santarém. Entre Cacilhas e o Montijo incluem-se também todas as zonas marginais potencialmente inundáveis, definidas pela cota altimétrica dos 5 m. A resolução espacial da malha varia entre 1 km e 10 a 30 m junto às margens. Efetuaram-se simulações de *hindcast* para 1972, com forçamento de maré e caudal fluvial, com EQM da ordem de 4-16 cm em todo o estuário. O modelo em modo de previsão foi validado com níveis numa estação de monitorização instalada na baía do Seixal, conduzindo a um EQM de 14 cm.

3. PLATAFORMA INTEGRADA WEBSIG PARA APOIO À EMERGÊNCIA EM EVENTOS DE INUNDAÇÃO

Apresenta-se nesta comunicação a plataforma WebGIS desenvolvida no projeto MOLINES para apoio à gestão de inundação e de emergência no estuário do Tejo, tendo como casos de estudo detalhados a baía do Seixal (vertente inundação estuarina) e a zona do Dafundo (vertente inundação urbana). Esta plataforma permite aceder à informação de inundação em qualquer dispositivo móvel ou fixo.

A plataforma está organizada ao longo de 4 eixos principais: 1) informação de alerta, disponibilizada de forma detalhada ou agregada a nível geográfico; 2) previsões em tempo real da inundação estuarina, com séries temporais em sensores virtuais e produtos SIG das variáveis níveis, velocidades e altura significativa da onda, assim como a validação em tempo real com os dados *online* disponíveis; 3) previsões em tempo real da inundação urbana, suportados por uma ampla base de dados de eventos de inundação urbanos que têm simultaneamente em conta o impacto da precipitação e os níveis no estuário; e 4) produtos de análise de risco, suportados por uma análise de perigosidade efetuada com os mesmos instrumentos de modelação usados na previsão em tempo real e uma análise detalhada de vulnerabilidade territorial. Todos os produtos aqui disponibilizados são descritos em detalhe em Fortunato *et al.*, 2015, Freire *et al.*, 2015 e Tavares *et al.*, 2015. Esta plataforma permite ainda aceder *online* a uma listagem e mapeamento de fotos cujo carregamento na plataforma é feito através de uma aplicação para telemóveis desenvolvida no projeto.

Esta plataforma é baseada na infraestrutura WebGIS do sistema WIFF (Oliveira *et al.*, 2014), tendo sido adaptada para cumprir os seguintes requisitos: a) disponibilizar acesso rápido aos resultados de monitorização, previsão e análise de risco; b) permitir o acesso em qualquer dispositivo e localização, desde que tenha ligação à internet; c) ser modular e flexível, para poder ser facilmente aplicada em outros sistemas costeiros e urbanos. Pretende-se ainda contribuir para uma mobilização coordenada e rápida de agentes de emergência e outras entidades durante eventos de inundação, permitindo a partilha de informação entre agentes no terreno e os centros de coordenação de emergência.

A plataforma WebGIS é composta pelo *back-end*, que executa as simulações e trata os dados e as previsões; e o *front-end*, que disponibiliza a informação do *back-end* e interage com o utilizador. O *back-end* utiliza CakePHP, uma base de dados PostgreSQL com PostGIS, várias instâncias de Geoserver e *scripts* Perl e Python. O Geoserver, usado para partilha de informação geográfica, gere e disponibiliza imagens georreferenciadas em formatos normalizados, armazenadas em base de dados PostgreSQL/PostGIS e resultados dos modelos de previsão em formato *shapefile*. O *front-end* consiste numa aplicação web que permite ao utilizador visualizar e interagir com a interface. Para o uso em vários dispositivos, como *tablets* e *smartphones*, usam-se tecnologias web recentes com menor necessidade de processamento: HTML5 e CSS3, AngularJS, Google Polymer e OpenLayers.

O sistema de alerta foi concebido para a Baía do Seixal (Fig. 2), usando pontos críticos obtidos da análise de exposição e impactos (Freire *et al.*, 2015) e identificados pelos serviços de proteção civil da Câmara Municipal do Seixal. Em cada ponto é calculada diariamente a previsão das alturas de água, com base nas previsões do modelo. Quando estas alturas ultrapassam o valor limite de inundação, emite-se um boletim de alerta, disponível através da plataforma e enviado às autoridades competentes por *email* (Fig. 2). O nível de alerta depende das alturas da água em cada ponto crítico. O limite de inundação inclui uma margem de erro para contabilizar a incerteza dos forçamentos, no modelo e na topografia. Na plataforma ficam ainda disponíveis as séries temporais que estão na base do alerta (Fig. 3). Este sistema foi validado operacionalmente com o evento de inundação em 8 de maio de 2016, onde a Curva da Mundet foi alagada (Fig. 4), tal como identificado nas previsões.

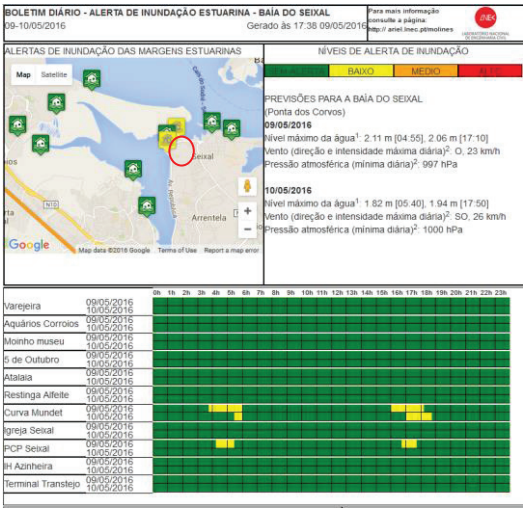


Fig. 2. Boletim de alerta para a Baia do Seixal (dias 9-10/5). Destacou-se o círculo vermelho o local Curva da Mundet.

O conceito do alerta do Seixal foi alargado à totalidade do estuário do Tejo e à costa Portuguesa, tirando partido das previsões de níveis e agitação marítima efetuadas. Exemplificam-se estes produtos para o boletim da costa Portuguesa (em testes, Fig. 5), suportado por previsões em três sensores virtuais na zona ocidental Norte, Centro e Sul de Portugal.

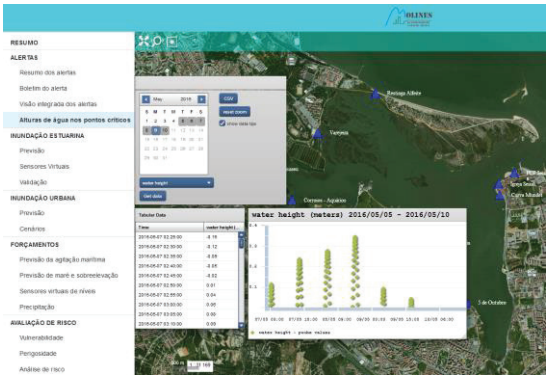


Fig. 3. Série temporal das alturas da água na Curva da Mundet, identificando o período e nível da inundação (interface WebGIS).

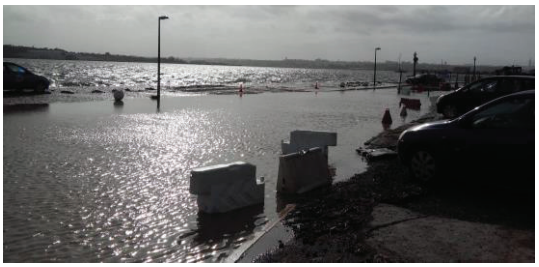


Fig. 4. Foto de dia 8 de maio às 17:00 na zona da curva da Mundet no Seixal (gentilmente cedida pelo Município do Seixal).

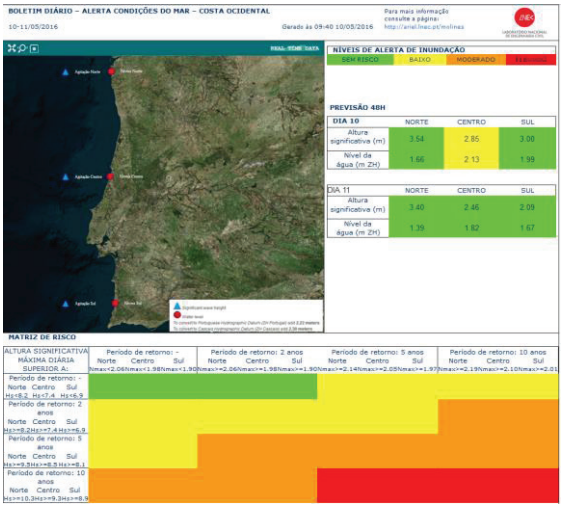


Fig. 5. Boletim de alerta para a costa ocidental Portuguesa

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No âmbito do projeto MOLINES foi desenvolvido um sistema de apoio à decisão para gestão de inundações, aplicável desde o planeamento até à resposta à emergência. Este sistema integra uma plataforma WebGIS que constitui um ponto único de acesso de toda a informação relevante, desde a análise de risco, suportada por produtos de perigosidade e vulnerabilidade de alta resolução, até à previsão em tempo real de eventos, baseada num sistema de previsão em tempo real de alta-resolução que simula todos os processos relevantes desde o oceano até à escala portuária. A plataforma WebGIS utiliza um conjunto de tecnologias estado-da-arte para agilizar o acesso à informação pelas entidades gestoras através de dispositivos fixos e móveis.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito dos projetos MOLINES (PTDC/AAG-MAA/2811/2012) e Roteiro de Infraestruturas INCD, financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT). O 7º autor é financiado pelo programa doutoral H2Doc.

REFERÊNCIAS

Dodet G., Bertin X., Taborda R. (2010). Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modeling*, 31 (3-4), 120-131.

Fortunato, A. B., Costa, R. T., Li, K., Rogeiro, J., Gomes, J., Rilo, A., Freire, P., Oliveira, A., 2015. Desenvolvimento de um sistema operacional de previsão dos níveis extremos na costa Portuguesa. VIII CPGZC, Univ. de Aveiro,15p.

Freire, P. M.S.; Tavares, A.O.; Fortunato, A.B.; Sá, L.; Oliveira, A.; Rilo, A.; Santos, P.P., 2015. Modelação da inundação em estuários. Da avaliação da perigosidade à gestão crítica. VIII CPGZC, Univ. de Aveiro, 15 p.

Oliveira A., Jesus G., Gomes J.L., Rogeiro J., Azevedo A., Rodrigues M., Fortunato A.B., Dias J.M., Tomás L.M., Vaz L., Oliveira E.R., Alves F.L., Boer S.D. (2014). An interactive WebGIS observatory platform for enhanced support of integrated coastal management, *Journal of Coastal Research*, S.I. 70: 507 - 512.

Oliveira A., Rogeiro J., Azevedo A., Fortunato A.B., Tavares da Costa R., Rodrigues M., Li K., Martins J.P., David M., Pina J., Gomes J. (2015). Sistema multi-escala de previsão em tempo real da dinâmica estuarina e costeira: desafios para a sua operacionalização em ambiente Cloud e de elevada performance, VIII CPGZC, 15 p.

Roland A., Zhang Y.J., Wang H.V., Meng Y., Teng Y.-C., Maderich V., Brovchenko I., Dutour-Sikiric M., Zanke U. (2012). A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids, *J. Geophysical Research*, 117, C00J33.

Tavares, Alexandre O; Santos, Pedro P.; Freire, Paula; Fortunato, A.B; Rilo, A.; Sa, L. 2015. Flooding hazard in the Tagus estuarine area: the challenge of scale in vulnerability assessments, *Environmental Sc. & Policy* 51, 1: 238 - 255.

Zhang, Y., Stanev, E.V. e S. Grashorn (2016) Unstructured-grid model for the North Sea and Baltic Sea: validation against observations, *Ocean Modelling*, 97, 91-108.

Evaluation of Remote Sensing Altimeter and ASAR Wave Data in the Eastern Nortern Atlantic

Isabel Bué (1) (2), Álvaro Semedo (2) (3), João Catalão (3) and Lotfi Aouf (4)

(1) Escola Naval, Base Naval de Lisboa, Alfeite, 2810-001 Almada, Portugal isabel.maria.bue@marinha.pt
(2) Escola Naval – CINAV, Almada, Portugal
(3) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, University of Lisbon, Portugal
(4) Division of Marine and Oceanography, Méteo-France, Toulouse, France

Abstract: One of the most important wave parameter to define the sea state is the significant wave height (SWH). Only through observations (mostly *in situ* and by Synthetic Aperture Radar (SAR) sensors) two dimensional surface ocean wave spectra can be measured. In this study altimeter and SAR SWH measurements are evaluated against buoys measurements and ERA-Interim reanalysis from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). The collocation of the data is carefully performed, through the triple collocation method, regarding the different time and space resolutions of the different datasets. The comparison between the altimeter SWH and the *in situ* measurements showed, in general, very good agreement. That was not the case for the "close to coast" western Portugal coast buoys. A good agreement between the SAR and buoy SWH measurements was also showed, despite the lower number of collocated observations and the SAR sensors neglecting the higher frequency waves.

Key words: significant wave height, synthetic aperture radar, wave spectra, reanalysis, assimilation

1. INTRODUCTION

Remote sensing wave measurements are a growing alternative for local wave climate projects. The best way to produce reliable wave climate statistics would be to rely on buoy observations (Semedo, et al. 2015). Nevertheless, wave buoy (in situ) measurements are disproportionally distributed near the coasts of industrialized countries, most of them located in the northern hemisphere. Remote sensing wave measurements are, therefore, a good alternative.

Remote sensing wave measurements, particularly from active microwave sensors like SAR – *Synthetic Aperture Radar* and radar altimeter (RA) offer an alternative approach to the measurement of ocean surface waves on a global scale. SAR sensors are capable of measuring wave spectra and can provide ocean surface two dimensional (2D; frequency and directional) spectra, with high spatial resolution, independently of cloud cover and daytime (Li et al.2011).

Advanced SAR (ASAR) sensors onboard satellites are operating in *wave mode* in order to retrieve several ocean wave parameters. This specific mode is dedicated to wave observation and was installed in several satellite plataforms, such as ERS-2, ENVISAT and SENTINEL-1, operating in C-band with VV polarization. With the possibility to measure wave spectra more integrated wave parameters can be used for validation of numerical wave models, data assimilation, etc., as well as global wave climate analysis and monitoring.

The wave mode space and time sampling can be used for a near real time automatic monitoring of ocean swell fields or on making predictions of swell states possible several days ahead of the wave front arrival (Collard et al, 2009). Consequently the (re)assimilation of SAR spectra into wave forecasts, or wave hindcasts or reanalysis, can be seen as a possibility to obtain higher accuracy wave data.

The assess to directional wave spectra is outmost importance to wave forecasting models, nevertheless the present limitations of the existing spectral retrieval schemes do not allow the operational use of SAR spectral data in the data assimilation process of operational wave forecasting models. SAR data has not been assimilated in the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) of the ERA-Interim reanalysis.

In this study significant wave height (SWH) comparisons between remote sensing altimetry measurements and several wave buoy measurements, in the Eastern Northern Atlantic, are confronted with the ECMWF ERA-Interim reanalysis, through a triple-collocation method. The triple collocation method (Caires et al. 2003; Janssen et al. 2007) will be carefully applied regarding the different time and space resolutions for the different datasets. The buoy positions are the key element for the positioning of all measurements, and the hour of the satellite overpass was chosen to be as the time key element for the choice of the time of all observations.

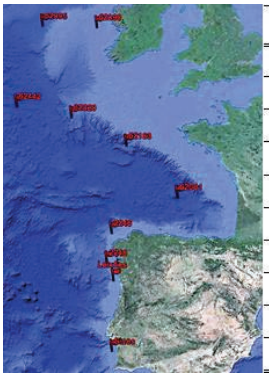
2. DATA AND METHODS

The buoy, satellite and ERA-Interim records have different time and space resolutions. Buoy observations are available hourly, exception made

for Leixões and Sines buoys that comes on 3 hours rather than hourly. Altimeter measurements are available every second and at distances of 7 to 10 km apart. For the SAR measurements the observations have a different acquisition time and the data points are 100 km apart. The ERA-Interim reanalysis data has 1ºx1º resolution at synoptic hours. In the following it will be described the data sets used in this study and explained how the data was processed in order to make the time and space scales of the different systems compatible and how they are collocated.

2.1. Buoy data

SWH data have been collected from 10 buoys located in the Northeast Atlantic (Fig. 1), which were made available from *Puertos del Estado* (2246 & 2248), *UK Met Office* (62442 & 62029), *Meteo-France* (62001 & 62163), *Marine Institute-Met Éireann* (62090 & 62095) and *Instituto Hidrográfico* (Leixões and Sines).



Buoy number (time series)	Buoy position (LAT-LON)
62095 (2006-2016)	(53N - 015.53W)
62090 (2002-2007)	(53.127N - 011.2W)
62442 (2010-2016)	(49N - 016.5W)
62029 (2006-2016)	(48.72N - 012.43W)
62163 (2002-2012)	(47.55N - 008.47W)
62001 (2002-2012)	(45.23N - 005W)
2246 (1998-2016)	(43.5N - 009.21W)
2248 (1998-2016)	(42.12N - 009.43W)
LEIXÕES (1993-2011)	(41.3167N – 008.983W)
SINES (1990-2011)	(37.921N – 008.9289W)

Figure 1- Buoys positions – Northeast Atlantic (left). Buoy time series in the right side table.

2.2. Satellites observations

The *GlobWave* data set is the output of the *GlobWave* project that covers the integrated set of information services based on satellite wave data. The GlobWave Level 2 Pre-processed (L2P) satellite wave dataset consists of Level-2 data from multiple SAR (ENVISAT) and altimetry (ERS-1/2, ENVISAT, JANSON-1/2, TOPEX), that are used in this study. While the altimeter wave data consist of total SWH of ocean waves, the SAR wave data from GW-L2P only consist of swell SWH. From ERS-1 through Janson-2, twenty four years of altimeter height measurements are available. Wave data from ERS1 was only used in comparisons made with *Leixões* and *Sines* buoys due to the overlapping data information since 1991 to 1996.

The ENVISAT orbit provides a 35-day repeat cycle, the same as the ERS-2 mission, and has on board ASAR instrument, operating at C-band, and one RA (apart from other sensors). When the ASAR was operating in *wave mode*, small images covering 6km x 5km to 10km x 5km were acquired along the orbit every 100 km. The ASAR *wave mode* data from ENVISAT were generally acquired in the *Image Swath 2* (IS2) with incidence angles around 23º and VV polarization (Li, Lehner e Burns 2011).

2.3. ERA-Interim reanalysis data

The ERA-Interim is a global atmospheric and wave reanalysis produced by the ECMWF and covers the period from 1 January 1979 onwards (Dee et al. 2011) and continues to be extended forward in near-real time. Every 6 hours ERA-Interim reanalysis offers a gridded wave data products, and assimilates altimetry wave data from ERS-1/2, ENVISAT and JANSON-1/2. No wave buoy data is assimilated. Only to harmonize the different altimeter wave height data an intercalibration is done regarding *in situ* buoys observations (Aarnes, et al. 2015).

2.4. Data colocation

A 1ºx1º "box" centered at each buoy position was created. The satellite altimetry measurements are performed about every second with a spacing less than 10 km. Grouping together all the consecutive remote sensing observations of each overpass of the satellite inside these boxes, and calculating the mean value for the SWH for each passage, we have reached to the value of one altimeter observation for passage per observation day. Depending on the revisiting time of each satellite, 2 to 6 altimetry observations per month were obtained, on average, for each buoy box. For SAR observations a lower number of measurements has been obtained, due to the 100 km spacing between each data point (image). The maximum time lagging between buoy observations and sensor measurements was 30 minutes, since the buoy data has been processed for full hours. The time lagging between the ERA-Interim reanalysis and the satellite overpass was higher because the reanalysis output is only at synoptic hours.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 2 shows the relation between all altimeter sensor measurements, and the buoys SWH measurements (Leixões and Sines buoys not included), with a correlation coefficient (R) of 0.96, a bias of 0.05 m, a root mean square error (RMSE) of 0.39 m, and a scatter index (SI) of 0.14, attesting the validity of the data collocation method. A separation between buoys is made hereafter between the northern buoys and the Leixões and Sines buovs.

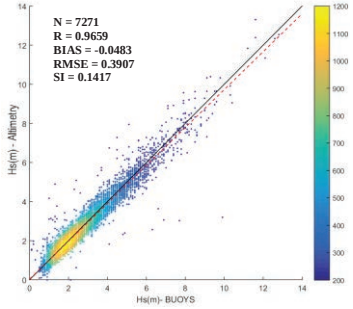


Fig. 2. Scatter plot satellite altimetry versus in situ SWH northern buoy measurements.

Table 1 – Statistics comparisons between altimeter and buoys measurements. Statistics comparisons in separate rows for Portuguese buoys (white row - Leixões / Sines) and for the other buoys (grew row). The statistics are presented per sensor (N = number of observations; R = correlation coefficient; Bias; RMSE = root-mean-square error and SI = scatter Index).

SATELLITE (altimeter sensor)	N	R	Bias (m)	RMSE (m)	SI
ERS1 (1991-1996)	---	---	---	---	---
	45 / 54	**0.755 / 0298**	**- 0.082 / 1.283**	**0.974 / 2.847**	**0.345 / 1.515**
ERS2 (1995-2009)	**1258**	**0.975**	**0.013**	**0.344**	**0.126**
	269 / 293	**0.489 / 0.164**	**0.529 / 2.088**	**1.379 / 4.573**	**0.645 / 2.525**
TOPEX (1992-2005)	**790**	**0.965**	**0.051**	**0.384**	**0.152**
	445 / 384	**0.255 / 0744**	**2.690 / 0.699**	**3.654 / 1.015**	**1.224 / 0.437**
ENVISAT (2002-2012)	**1607**	**0.959**	**0.025**	**0.420**	**0.154**
	324 /315	**0.234 / 0.163**	**2.546 / 3.425**	**4.822 / 4.766**	**2.068 / 2.154**
JANSON1 (2002-2014)	**2097**	**0.976**	**0.103**	**0.351**	**0.121**
	457 / 309	**0.289 / 0575**	**0.859 / 0.702**	**2.654 / 1.083**	**1.161 / 0.497**
JANSON2 (2008-2015)	**1519**	**0.977**	**0.045**	**0.319**	**0.112**
	234 / 110	**0.197 / 0.772**	**4.678 / 1.102**	**5.724 / 1.309**	**1.545 / 0.426**

The boxes around the buoys size at these latitudes is about 100 km in longitude and 120 km in latitude. Hence the maximum distance between the satellite swath inside the box and the buoy was less than 50 km. A larger box dimension (1.5ºx1.5º, for example, as in Caires et al. 2003) will lead to larger distances between the satellite swaths inside the box and the buoy position, but to larger differences between the altimeter and buoys measurements. Therefore we believe that, taking into account the buoy positions, the choice for the box dimension for the data collocation was the most adequate.

The separate statistics (R, bias, RMSE and SI) per sensor (comparison with the aggregate northern buoy measurements used in Fig. 2) are shown in Table 1. The same statistics resulting from the comparison between each sensor and Leixões and Sines buoys are also shown in this table. The statistics for the altimeter comparisons with the northern buoys are considerably better than the Leixões and Sines ones.

For example for the northern buoys R > 0.95, but for the Portuguese coastal buoys the correlation coefficients are considerably lower (0.16 < R < 0.77). The biases are also considerably higher in Leixões and Sines buoys. These errors are caused most probably by theses buoys proximity to the coast, where SWH altimeter measurements are known to perform poorly. Fig. 3 shows the scatter plots between all altimeter measurements and the Leixões and Sines SWH measurements. As can be seen the altimeters frequently overestimate the SWH measurements in comparison with the buoys, leading to poor statistics values.

Taking into account that the buoy measurements are not assimilated in the ERA-Interim, the scattered plots depicted in Fig. 4 show good agreement and correlation coefficients for the comparisons between the northern buoys and the reanalysis output (R > 0.96). It should be noted that the higher values for the RMSE and for the SI were achieved in the buoys that are positioned closer to shore (Fig. 4 e, f, g and h). It can also be seen, for these specific buoys that the reanalysis underestimates the higher values of SWH (which is known; Dee et al, 2011).

In spite of the problems stated before for the Leixões and Sines buoys and taking into count their proximity to shore and low depth location, the correlation coefficients with the ERA-Interim reanalysis, shown in Fig 5 are higher (R > 0.94). The errors can also be considered as low (Bias < -0.14, and RMSE < 0.35m), and comparable to the northern buoys ones (Fig. 4).

The scatter plots between the SWH SAR observations with the northern buoys, and with the ERA-Interim reanalysis are shown in Fig. 6. As can be seen the number of SAR observations is considerably lower compared to the altimeter ones. The reader should have in mind that the SAR wave spectral observations (or retrievals), from where the SWH is calculated, has a cut-off for higher wave frequencies (wind sea), i.e., it observes mainly swell waves. For that reason the statistics are worse than those shown before for the altimeter sensors (R < 0.77, Bias < -0.26, and RMSE < 1.23 m).

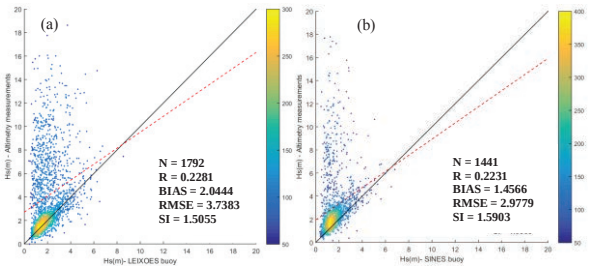


Fig. 3. Scatter plots with statistics comparisons between altimeter SWH measurements: (a) Leixões buoy and (b) Sines buoy.

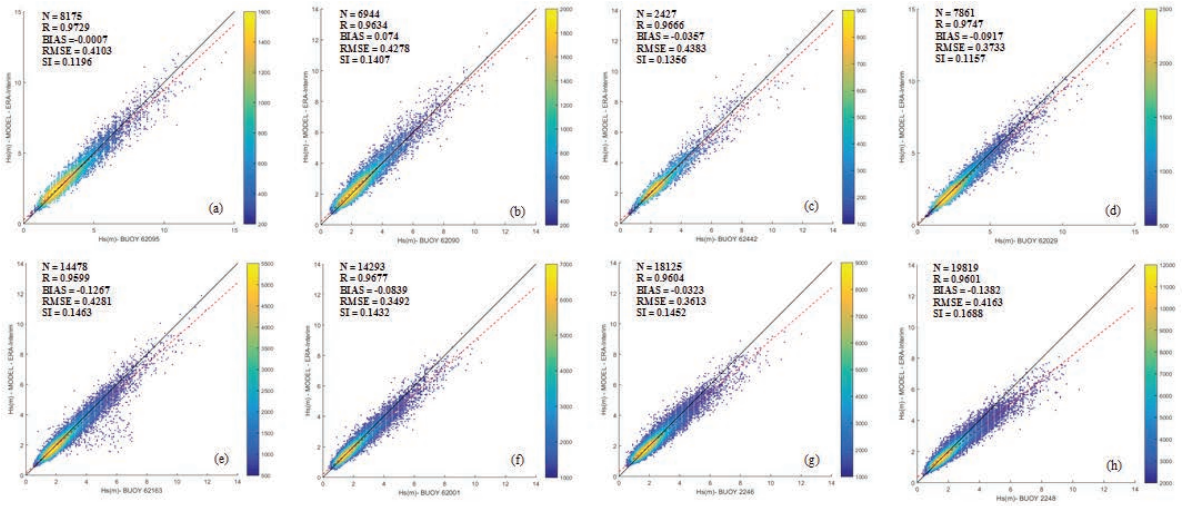


Fig. 4. Scatter plots of ERA-Interim versus northern buoy SWH measurements: (a) 62095 buoy, (b) 62090 buoy, (c) 62442 buoy, (d) 62029 buoy, (e) 62163 buoy, (f) 62001 buoy, (g) 2246 buoy and (h) 2248 buoy. The scatter plots shows the statistic comparisons results between ERA-Interim versus northern buoys (N = number of observations; R = correlation coefficient; Bias; RMSE = root-mean-square error and SI = scatter Index).

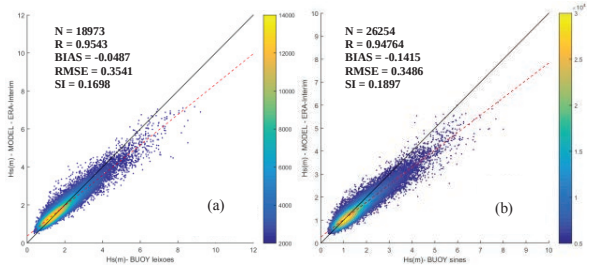


Fig. 5. Scatter plots of ERA-Interim versus buoys SWH measurements: (a) Leixões buoy and (b) Sines buoy.

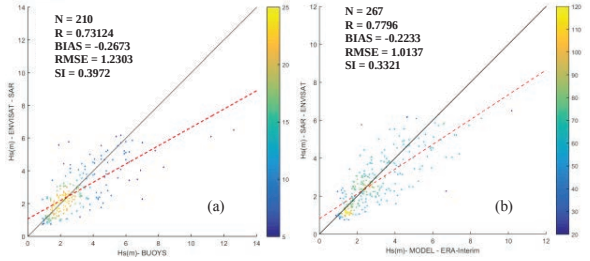


Fig. 6. Scatter plots with statistics comparisons of SAR SWH measurements: (a) SAR versus northern buoys and (b) SAR versus ERA-Interim.

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

In the present study altimeter and SAR wave observations (SWH) were compared with buoy observations and reanalysis data. The buoy positions were the center of the 1ºx1º sampling boxes.

- The comparison between the altimeter SWH and the in situ measurements at the northern buoys showed very good agreement.
- That was not the case with the Leixões and Sines buoys, most probably due to their very low distance to shore but also to their relatively low mooring depth.
- Despite the fact that SAR SWH neglects the high frequency waves, these wave estimations showed some agreement with buoy observations that would most probably be better if only the swell SWH had been compared.

Future work will lead to the optimal interpolation of 2D SAR wave spectra with ERA-Interim spectra (the re-assimilation post-processing process). The SWH computed from the corrected spectra will further be collocated and compared with buoy observations and altimeter SWH measurements, as well as with the original ERA-Interim SWH, to assess the goodness of the spectral correction model. We plan to follow this method for existing SAR observations (used in this study) but also with data soon to be available from the ASAR S*entinel-1* and *Sentinel-3 Radar Altimeter*.

REFERENCES

Aarnes, O. J., Abdalla, S., Bidlot, J.-R., & Breivik, O. (2015). Marine wind and waves height trends at different ERA-Interim forecast ranges. *Journal of Climate*, 819-837.

Caires, S., & Sterl, A. (2003). Validation of ocean wind and wave data using triple collocation. *Journal of Geophysical Research, 108, 3098.*

Collard, F., Ardhuin, F., & and Chapron, B. (2009). Monitoring and analysis of ocean swell fields from space: Newmethods for routine observations. *J. Geophys. Res., 114*.

Dee, D., & Coauthors. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137*, 553-597.

Husson, R. (2012). *Development and validation of a global observation - based swell model using wave mode operating SAR.*

Janssen, P. A., Abdalla, S., Hersbach, H., & Bidlot, J.-R. (2007). Error Estimation of Buoy, Satellite and Model Wave Height Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1665-1677.

Li, X.-M., Lehner, S., & Burns, T. (2011). Ocean wave integral parameter measurements using Envisat ASAR wave mode data. *IEEE Transaxtions on Geoscience and Remote Sensing, 49*, 155-174.

Semedo, A., Vettor, R., Breivik, O., Sterl, A., Reistad, M., Soares, C. G., & Lima, D. (2015). Te wind sea and swell waves climate in the Nordic seas. *Ocean Dynamics, 65*, 223-240.

Uso do modelo HYCOM no planeamento de um voo não tripulado de observação do oceano.

M. Guerreiro (1), A. Jorge da Silva (1), I. Golde (1) e L. Quaresma (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49 1249-093 Lisboa, martha.guerreiro@hidrografico.pt.

Resumo: A região remota do Banco Gorringe foi recentemente incluída na Lista Nacional de Sítios, ao abrigo da Directiva Habitats. No âmbito do projecto SOCO-DRONE pretende-se desenvolver dois UAVs que facilitem a monitorização e a vigilância oceânica de áreas protegidas remotas. Neste trabalho irão ser apresentados os produtos de apoio ao planeamento do voo final de demonstração, com base nos resultados do sistema de previsão da circulação oceânica, recentemente implementado no Instituto Hidrográfico. Estes produtos serão utilizados na definição das especificações dos instrumentos para observação da camada superficial do oceano, na programação da missão e na comparação com os dados adquiridos durante o voo.

Palavras-chave: circulação oceânica, sistema de previsão, monitorização, planeamento, UAVs.

1. INTRODUÇÃO

Os oceanos cobrem 70% da superfície do nosso planeta. A crescente degradação do estado dos oceanos e dos seus recursos, faz com que a sua preservação seja fundamental tanto para a sustentabilidade da humanidade como para toda a biodiversidade do planeta. Com o desenvolvimento de métodos mais eficientes de captura, a pesca industrial em conjunto com a pesca ilegal, tem levado à sobreexploração de várias espécies marinhas. Para além deste facto, o aumento do tráfego marítimo tem contribuído para o aumento da poluição do meio marinho e também para a disseminação de espécies invasoras que colocam em risco a biodiversidade autóctone.

Actualmente, apenas 1% da superfície do oceano está designada como área protegida. A criação de áreas marinhas protegidas visa a preservação dos ecossistemas marinhos e da sua biodiversidade, através da aplicação de medidas que protegem os habitats e as espécies marinhas mas que também integram as actividades humanas de forma sustentável.

Na Zona Económica Exclusiva Portuguesa existem várias áreas marinhas protegidas tanto no continente, como na Madeira e nos Açores. Recentemente, o Banco Gorringe foi incluído na Lista Nacional de Sítios, ao abrigo da Directiva Habitats.

1.1. Local de estudo

O Banco Gorringe é um monte submarino, que se localiza no oceano Atlântico, a cerca de 200 km do Cabo de S. Vicente, Sagres, Portugal (Figura 1). Com cerca de 180 km de comprimento e uma altura de 5000 m desde o fundo oceânico, o Banco Gorringe tem dois picos menos profundos: Ormonde e Gettysburg, a 48 m e 25 m profundidade respectivamente. A fisiografia neste local é caracterizada por relevos irregulares submarinos de grandes dimensões e vertentes com acentuados declives. Neste local encontram-se dois importantes habitats marinhos, recifes e bancos de areia de origem biogénica, permanentemente cobertos por água do mar pouco profunda. Estas características fisiográficas condicionam a circulação oceânica em redor do monte submarino.

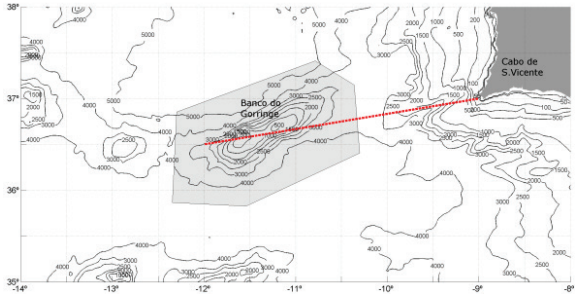


Fig.1. Localização do Banco Gorringe. O polígono a cinzento representa a área que integra a Lista Nacional de Sítios e a linha a tracejado vermelha representa o trajecto do voo que os UAVs irão fazer.

1.2. Projecto SOCO-DRONE

A monitorização das reservas marinhas protegidas, costeiras e oceânicas, é essencial para a preservação dos seus ecossistemas e da sua biodiversidade. Os meios actuais não possibilitam uma vigilância constante e económica, principalmente em zonas remotas como o Banco Gorringe. Com vista a aumentar a capacidade nacional de monitorização nestas regiões, o projecto SOCO-DRONE (Sistema de Observações Costeiras e Oceânicas baseado em DRONEs), visa o desenho e desenvolvimento de dois UAVs (Unmanned Aerial Vehicle) com elevada autonomia e longo alcance, equipados com sensores ambientais focados na monitorização e vigilância oceânica.

A conclusão deste projecto contempla a realização de um voo de demonstração sobre o oceano, ida e

volta do cabo de Sagres ao Banco Gorringe (500 km), durante o qual serão recolhidas imagens da superfície do mar, com transmissão em tempo real para uma estação de controlo em terra. Complementarmente, serão lançados durante o trajecto perfiladores de temperatura, que irão registar a estrutura térmica vertical da camada superficial do oceano. O planeamento deste voo será realizado com base na estrutura térmica do oceano prevista para o momento da missão, de forma a optimizar os pontos de observação e validar os modelos numéricos de circulação oceânica, que correm diariamente no Instituto Hidrográfico (IH).

2. SISTEMA DE PREVISÃO DA CIRCULAÇÃO OCEÂNICA

Recentemente, o IH implementou um sistema de previsão da circulação oceânica, da margem continental Portuguesa, baseado no modelo HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model). Este modelo utiliza um sistema de coordenadas híbridas que se adaptam às características topográficas e à estrutura termohalina do oceano. Desta forma, o modelo permite uma excelente resolução em zonas costeiras e na camada limite de mistura oceânica, em detrimento de uma menor resolução nas zonas mais profundas do oceano onde as águas são pouco estratificadas. Na aplicação do modelo oceânico no IH é utilizada uma malha computacional que cobre toda a área da margem continental portuguesa, com uma resolução horizontal de 1 milha e uma resolução vertical de 32 níveis híbridos.

O sistema de previsão da circulação oceânica foi concebido para que opere de forma automática, ou seja, todos os processos de transferência e de pré e pós processamento de informação apenas necessitam de alguma vigilância. Diariamente, o IH recebe os resultados dos modelos de previsão atmosférica do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), através do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) e os resultados do modelo oceânico MERCATOR OCEAN, que provém do SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine). Estes resultados são pré-processados e utilizados como forçamentos no modelo HYCOM.

O modelo realiza uma previsão das condições oceânicas para cinco dias. A partir dos resultados obtidos com o modelo (temperatura, salinidade, elevação da superfície e correntes) são posteriormente criados vários produtos de apoio, que são utilizados no planeamento de missões e exercícios militares e preparação de campanhas para projectos de investigação e desenvolvimento tecnológicos.

3. PLANEAMENTO DO VOO DE DEMONSTRAÇÃO

O voo dos UAVs será pré-programado, realizando-se de forma autónoma, mas com possibilidade de a partir da estação de controlo em terra se alterarem os parâmetros de altitude e rota consoante as condições atmosféricas. Durante o voo de demonstração, pretende se obter dados da estrutura térmica vertical da camada superficial do oceano (máximo 300 m de profundidade). Como tal, uma parte do planeamento do voo será realizado com base na estrutura térmica do oceano prevista para o momento da missão, de forma a optimizar os pontos de observação. Com base nos resultados do modelo, irão obter-se vários produtos de apoio específicos para o projecto. Como por exemplo, a previsão do campo tridimensional da temperatura para o momento da missão (Figura 2).

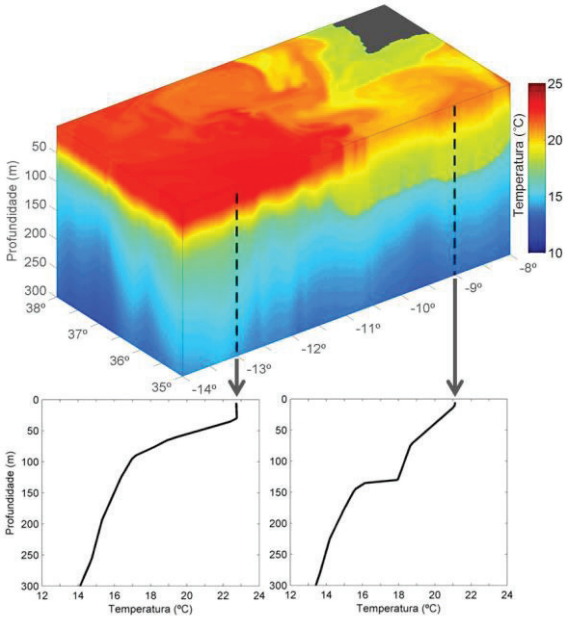


Fig.2. Campo tridimensional da temperatura do oceano obtido com o modelo HYCOM para 6-09-2015 06:00, na área a SW da costa do Continente, compreendendo o Banco Gorringe.

Em ambos UAVs estarão instaladas duas camaras, uma no visível e outra no infravermelho térmico. A camara térmica instalada na aeronave permitirá recolher imagens da temperatura da superfície do oceano ao longo do voo e que serão transmitidas em tempo real para a estação em terra. A obtenção da temperatura superficial do oceano do voo em tempo real, permitirá rectificar as posições programadas de largada dos sensores de temperatura. Os perfis de temperatura obtidos ao longo do voo serão posteriormente usados na validação das previsões obtidas com o modelo de circulação oceânica, o HYCOM. O Instituto Hidrográfico assumirá o duplo papel de parceiro e destinatário final dos resultados obtidos durante o voo até ao Banco Gorringe.

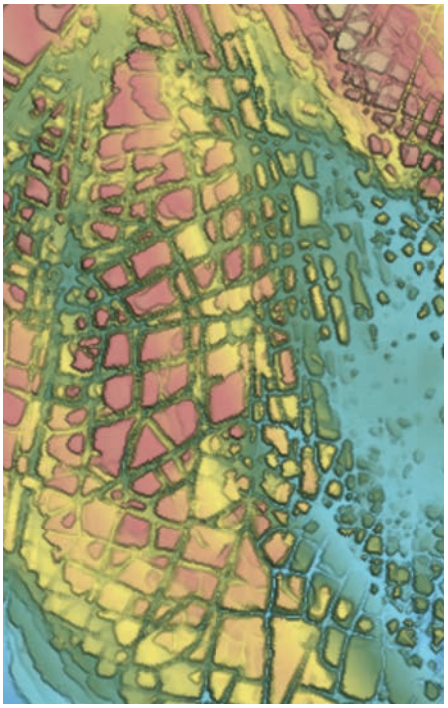
Agradecimentos

O presente trabalho é uma contribuição para o projeto SOCO-DRONE (Sistema de Observações Costeiras e Oceânicas baseado em DRONEs), Project PT02_Aviso4_0011, parcialmente suportado pelo mecanismo de financiamento da Área Económica Europeia (EEA Grants).

OCEANOGRAFIA FÍSICA

4as JORNADAS DE ENGENHARIA HIDROGRÁFICA

21, 22 E 23 DE JUNHO DE 2016



Mecanismo da pluma β e sua aplicação ao sistema da Corrente e Contracorrente dos Açores

C. Lopes da Costa (1)

(1) Escola Naval, Marinha, carlos.lopes.costa@marinha.pt

Resumo: A Corrente dos Açores além de descrita por um ramo da Corrente do Golfo, como geostrófica e baroclínica, tem sido relacionada, a par da Contra Corrente dos Açores, como induzida por fonte de vorticidade associada à entrada e afundamento de água mediterrânica para níveis inferiores no golfo de Cádis. Têm sido propostos os mecanismos de plumas β planetária e β* topográfica. Neste artigo apresenta-se uma tentativa de explicação e de interpretação das Corrente e Contracorrente dos Açores pelos mecanismo de plumas β e β*.

Palavras-chave: Corrente e contracorrente dos Açores, plumas β planetária e β* topográfica.

1. INTRODUÇÃO

A Corrente dos Açores (CA) é descrita como um ramo da Corrente do Golfo, que desta se separa nos Grandes Bancos, ao largo da Terra Nova, e que atravessa a bacia atlântica até ao golfo de Cádis (e.g. Juliano *et al.*, 2007; Ozgokmen *et al.*, 2001; Kida *et al.*, 2007). É tida como uma corrente baroclínica, associada à frente dos Açores, apresentando variabilidade de mesoescala, com meandros e geração de *eddies* (e.g. Volkov *et al.*, 2010; Juliano *et al.*, 2007), com caudal para leste de 7 a 13 Sv (1 Sv = 106 m^3/s), entre 32^0 e 36^0 N. A norte dela consta-se outra corrente zonal e de sentido contrário, de menor transporte, de 2 a 8 Sv, entre 37^0 e 38^0 N, a Contra Corrente dos Açores (CCA) (e.g. Juliano *et al.*, 2007; Ozgokmen *et al.*, 2001). Em figura 1 consta esquema com as principais correntes da região de interesse em estudo.

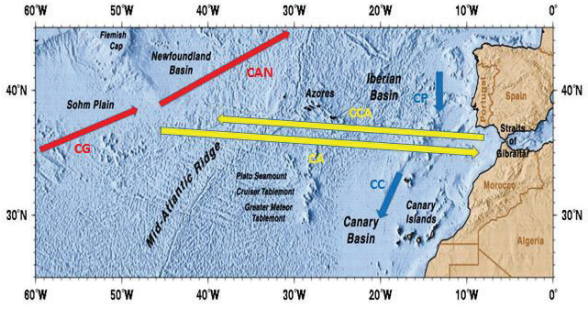


Fig. 1. Esboço com as correntes do Golfo (CG), do Atlântico Norte (CAN), de Portugal (CP), das Canárias (CC), dos Açores (CA) e Contracorrente dos Açores (CCA). Adaptado de imagem no Google.

No oceano superior, no lado norte do golfo de Cádis, verifica-se uma circulação ciclónica na ligação entre as CA e CCA (e.g. Kida *et al.*, 2007). Vários estudos, apoiados em simulações numéricas, indicam que essa circulação está associada à troca de massa entre o Mediterrâneo e o Atlântico, e é explicável pelo mecanismo de plumas β planetária e β* topográfica (e.g. Ozgokmen *et al.*, 2001; Kida *et al.*, 2007;Volkov *et al.*, 2010). A partir dos princípios e leis físicas procura-se chegar a explicação para aqueles mecanismos e aplicação às CA e CCA.

2. LEIS FÍSICAS EM DINÂMICA OCEÂNICA

2.1. Equações da continuidade e da geostrofia

Dois princípios físicos relevantes são a conservação da massa, expressa pela equação da continuidade, e a conservação de quantidade de movimento, expressa pela equação do movimento. A equação da continuidade, assumindo incompressível, $\boldsymbol{\nabla}.\boldsymbol{V} = 0$ ou $\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0$ (1), significa escoamento tridimensional não divergente. As variáveis u e v são as componentes horizontais zonal e meridional, segundo as coordenadas x e y, do vetor da velocidade V, e w a componente vertical, segundo z, de V. A equação do movimento pode ser simplificada, no contexto de movimentos de escala grande, para o equilíbrio geostrófico ou $2\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{V_H} = -\frac{1}{\rho}\boldsymbol{\nabla_z} p$, com $\boldsymbol{\omega}$ a velocidade angular da rotação da Terra, $\boldsymbol{V_H}$ a velocidade horizontal, ρ a densidade e $\boldsymbol{\nabla_z} p$ o gradiente horizontal da pressão. Na forma de componentes horizontais escreve-se $fv = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}$ (2) e $fu = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}$ (3), onde p é a pressão e $f = 2\omega\, sen\, \varphi$ o parâmetro de Coriolis, dependente da latitude φ. O escoamento, paralelo às isóbaras, é anticiclónico e ciclónico em torno de altas e baixas pressões.

2.2. Efeito β ou variação do parâmetro de Coriolis

A variação do parâmetro de Coriolis, f, com a latitude, $\beta = \frac{\partial f}{\partial \varphi}$, tem consequências dinâmicas. Pode aproximar-se esse efeito, fazendo-o variar linearmente, dentro de faixas limitadas de latitude, através da aproximação do plano β, em que $f = f_0 + \beta\varphi$, $f_0 = 2\omega\, sen\, \varphi_0$ e $\beta = \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{2\omega\cos\varphi_0}{a}$. φ_0

é a latitude de referência na definição do plano β e $a \approx 6.376 \times 10^3 m$ o raio terrestre.

2.3. *Equação da vorticidade geostrófica ou relação de Sverdrup*

Por diferenciação cruzada das (2) e (3) e com a (1) chega-se a $\beta v = f \frac{\partial w}{\partial z}$ (4), a relação de Sverdrup. Esta pode ser aplicada ao contexto do *Mediterranean Outflow Water* (MOW). Uma perda de massa da camada superior ($\frac{\partial w}{\partial z} > 0$) é equilibrada por escoamento para norte ($v > 0$) no hemisfério norte. Tal escoamento para norte requer compensação com movimento para sul, algures nessa latitude, com esses fluxos a ser ligados por dois fluxos zonais que fechem a circulação ciclónica, a pluma β planetária (Lamas, 2009). A geostrofia aplicada a modelo de duas camadas (superior ativa 1 sobre a inferior passiva 2) passa a $\boldsymbol{f \times V_{H1}} = -g_1{}' \nabla h_1$ ou, na forma de componentes, $f v_1 = g_1{}' \frac{\partial h_1}{\partial x}$ (5) e $-f u = g_1{}' \frac{\partial h_1}{\partial y}$ (6). $g_1{}' = \frac{g(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1}$ a gravidade reduzida e ∇h_1 o gradiente horizontal da espessura instantânea da camada 1.

3. ESTIMATIVA DE TRANSPORTE DA PLUMA β PLANETÁRIA PELA RELAÇÃO DE SVERDRUP

Da análise de escala da (4), com $W \ll \frac{UH}{L}$ (esta resulta da análise de escala da continuidade (1)) para movimentos de escala horizontal, L, muito maior do que a escala vertical, H, resulta $W = \frac{\beta UH}{f_0}$ (7) (ver 5.1.2. de Vallis (2006)). W é a escala típica da variação das velocidades verticais w, U escala típica de variação das velocidades horizontais u e v. A (7) permite relacionar os transportes vertical, W, e horizontal, U, tendo em conta a espessura da camada ativa, H, e as magnitudes de β e f_0. Teremos para $\frac{U}{W} = \frac{f_0}{\beta H} = \frac{8{,}57 \times 10^{-5}}{1{,}85 \times 10^{-11} \times 1.000} \approx 4.630$, valor excessivo. Para realismo, esperaríamos cerca de dez. Assim, apenas argumentos de vorticidade planetária (efeito β) são insuficientes. A variação da batimetria na região do fluxo da MOW deverá ser importante (efeito β topográfico, β*). A figura 2 mostra a variação da batimetria na zona do golfo de Cádis e a figura 3 um esquema do transbordo, pelo *sill* de Gibraltar, e afundamento da água mediterrânica, com incorporação por mistura de água atlântica, até cerca de 1.000-1.100 m no golfo de Cádis.

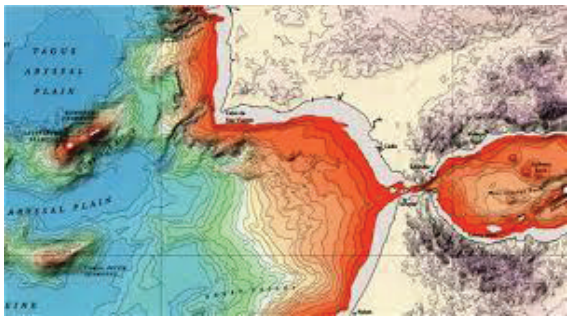


Fig. 2. Representação da batimetria no golfo de Cádis. Disponível no Google.



Fig. 3. Esquema da troca de água atlântica e mediterrânica pelo sill de Gibraltar. Disponível no Google.

4. ESTIMATIVA DE TRANSPORTE PELA PLUMA β^* TOPOGRÁFICA

Kida *et al.* (2007) definem $\beta^* \equiv f_0 \frac{\alpha}{H}$, α o declive do fundo. A expressão para a relação dos transportes é adaptada para $\frac{U}{W} = \frac{f_0}{\beta^* L_y}$. L_y é a dimensão, ao longo das batimétricas, da região onde se verifica a perda de massa. Valores razoáveis para os parâmetros são L_y = 30.000 m e α = 0,01 (Kida *et al.*, 2007). Com H = 1.000 m teremos $\beta^* \equiv f_0 \frac{\alpha}{H} = 8{,}57 \times 10^{-5} \times \frac{0{,}01}{1.000} = 8{,}57 \times 10^{-10} s^{-1} m^{-1}$ e $\frac{U}{W} = \frac{f_0}{\beta^* L_y} = \frac{8{,}57 \times 10^{-5}}{18{,}57 \times 10^{-10} \times 30 \times 10^3} = 3{,}33$. Logo, para o caudal descendente W, de 2 Sv (para a MOW), teremos um caudal horizontal de 6,66 Sv, valor razoável para a CA. Daí Kida *et al.* (2007) colocarem a hipótese de a CA ser originada por um ramo da pluma β^* topográfica. Assim, a perda de 2 Sv na vertical seria compensada, na horizontal, com fluxo para o sumidoiro, pela CA, de cerca de 7 Sv, e o excesso de 5 Sv disponível para fluir de volta ao oceano aberto pela Corrente da Vertente (CV) e pela CCA. Isso é consistente com Mauritzen *et al.* (2001).

5. MOVIMENTO QUASE-GEOSTRÓFICO EM DUAS CAMADAS E ONDAS ROSSBY

Quando a escala horizontal do movimento é semelhante ao raio de deformação, cerca 50 km no oceano, as equações quase-geostróficas são mais realistas que as geostróficas para a dinâmica no contexto da circulação e variabilidade de mesoescala. A partir delas se deduz a relação de dispersão das ondas Rossby planetárias $\omega_0 = \frac{-\beta k}{k^2 + l^2}$ (modo barotrópico) e $\omega_1 = \frac{-\beta k}{k^2 + l^2 + F_1 + F_2}$ (modo baroclínico). As velocidades de fase, na componente x, para os modos barotrópico e baroclínico são

$c_{pxo} = \frac{\omega_0}{k} = \frac{-\beta}{k^2+l^2}$ e $c_{px1} = \frac{\omega_1}{k} = \frac{-\beta}{k^2+l^2+F_1+F_2}$, i.e. para oeste. $F_1 = \frac{{f_0}^2}{gh_1}$ e $F_2 = \frac{{f_0}^2}{gh_2}$ são os inversos dos quadrados dos raios de deformação nas camadas 1 e 2, de espessuras h_1e h_2. k e l são as componentes horizontais zonal e meridional do vetor número de onda. Um comprimento de onda típico para uma onda Rossby barotrópica no oceano é 1.000 km e a velocidade de fase, $c_{p0} = \frac{\omega}{k} = 24\frac{cm}{s} \approx 20{,}7$ km/dia para oeste. Um comprimento de onda típico para uma onda Rossby baroclínica no oceano é 50 km e a velocidade de fase, $c_{p1} = \frac{\omega}{k} = 2{,}5\frac{cm}{s} \approx 2{,}2$ km/dia para oeste. São as velocidades de fase para oeste das ondas Rossby, propagadas pelo efeito β, que na literatura, por exemplo em Ozgokmen *et al.* (2001) e em Volkov *et al.* (2010), são tidos como responsáveis pelo desenvolvimento zonal da circulação ou vortex ciclónico, incluindo a CA e a CCA, desde a entrada fixa de vorticidade no golfo de Cádis para oeste, na dimensão da bacia oceânica. Também J. Wang *et al.* (2014) demonstraram a geração de jatos zonais ondulatórios, em estrias alternadas, no meio do oceano, pela radiação para oeste de instabilidades (ondas longas Rossby) emitidas de correntes de fronteira oriental com longos comprimentos de onda meridionais.

6. MECANISMO DE PLUMA B PLANETÁRIA

Com $f = f_0 + y\beta$ (plano β), $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{W_d}{H}$ (a continuidade) e $v = \frac{f}{\beta H} W_d$ (a relação de Sverdrup), substituindo esta para v e assumindo β e H não variáveis em y, fica $\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{f}{\beta H} W_d\right) = \frac{W_d}{H} + \frac{f}{\beta H}\frac{\partial W_d}{\partial y}$ e substituindo esta na da continuidade dá $\frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{W_d}{H} + \frac{f}{\beta H}\frac{\partial W_d}{\partial y}\right) = -\frac{W_d}{H}$, o que implica $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{2W_d}{H} + \frac{f}{\beta H}\frac{\partial W_d}{\partial y} = 0$ ou $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{2W_d}{H}\frac{\beta f}{\beta f} + \frac{f}{\beta H}\frac{\partial W_d}{\partial y} = 0$, ou também, com $2W_d\beta f = W_d\frac{\partial f^2}{\partial y}$, $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\beta f H}\left(W_d\frac{\partial f^2}{\partial y} + f^2\frac{\partial W_d}{\partial y}\right) = 0$, e sendo $W_d\frac{\partial f^2}{\partial y} + f^2\frac{\partial W_d}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y}(f^2 W_d)$, dá $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\beta f H}\frac{\partial}{\partial y}(f^2 W_d) = 0$, e $\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\beta f H}\frac{\partial}{\partial y}(f^2 W_d)$, $u = -\frac{1}{\beta f H}\int_{x_e}^{x}\frac{\partial}{\partial y}(f^2 W_d)dx'$, $x = x_e$ na fronteira leste, ou $u = -\frac{1}{\beta f H}\int_{x}^{x_e}\frac{\partial}{\partial y}(f^2 W_d(x', y))dx'$ (8). Esta diz que para uma perda de massa descendente, para baixo da camada ativa, que aumente com a latitude, y, até atingir um máximo (w_d negativo e a aumentar a magnitude com y) seguido de decréscimo (w_d negativo e a diminuir a magnitude com y), a velocidade zonal é para leste a sul do máximo negativo (associar à CA) e para oeste a norte do máximo negativo (associar à CCA). O escoamento é, assim, bidirecional (para leste no lado sul e para oeste no lado norte). A (8) depois de alguns passos envolvendo derivadas de produtos fica $uH = -\int_x^{x_e}\left[w_d(x', y) + \frac{1}{\beta}\frac{\partial}{\partial y}\left(f w_d(x', y)\right)\right]dx'$ (9) e integrando entre as latitudes y_1 e y_2, de modo a englobar os dois jatos temos o transporte resultante $\int_{y_1}^{y_2} uH\, dy = \int_{y_1}^{y_2}\int_x^{x_e} -w_d\, dx\, dy -$ $\frac{1}{\beta}\int_x^{x_e} f[w_d(y_2) - w_d(y_1)]\, dx$ (10). O primeiro termo no lado direito é o transporte zonal correspondente à perda de massa, na extensão da circulação. O segundo é transporte horizontal de recirculação. A (10) integra para zero na dimensão meridional. A interpretação das expressões, segundo Ozgokmen et al. (2001): (i) velocidades não nulas existem só na proximidade da região de afundamento ou a oeste dela; (ii) o escoamento consiste em duas componentes, a vertical devida à descompensação da massa e a de recirculação horizontal; (iii) a recirculação flui para leste, a sul do centro do afundamento e para oeste, a norte do centro de afundamento, ou seja, a circulação é ciclónica para uma perda de massa; (iv) a extensão meridional da circulação é limitada à região do afundamento, mas efeitos de atrito, podem ter influência nessa extensão. Isto é consistente com a pluma β planetária, com CA e CCA, induzida pela MOW. Um esquema da pluma planetária é mostrado na figura 4.

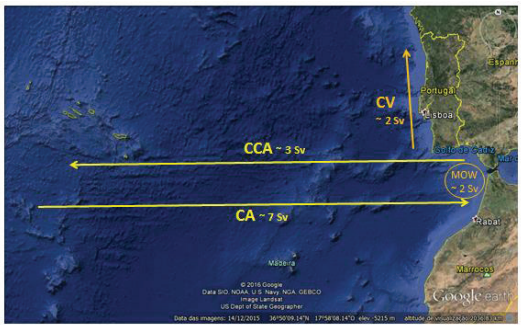


Fig. 4. Esquema da pluma planetária com a Corrente dos Açores (CA), Contracorrente dos Açores (CCA), zona de descida da água mediterrânica (MOW) e Corrente da Vertente (CV). Adaptado do Google Earth.

7. LIGAÇÃO DA PLUMA B* TOPOGRÁFICA À PLUMA B PLANETÁRIA EM MAR ABERTO

A física das plumas β planetária e β* topográfica é determinada por conservação de vorticidade potencial (VP). A β manifesta-se em mar aberto, onde o escoamento da camada ativa não é afetado pela batimetria e o efeito β planetário é o relevante. O escoamento horizontal manifesta-se por dois ramos zonais de sentido oposto, a partir da zona de entrada de VP, pelo fluxo intrusivo descendente. Porém, a pluma β* topográfica manifesta-se em mar costeiro, sobre a plataforma e talude continentais, onde a variação da profundidade é relevante na VP.

O escoamento horizontal, induzido por fluxo descendente, é manifestado por dois ramos, de sentido contrário, orientados com a batimetria. Coloca-se a questão de como a partir de pluma β* topográfica, iniciada e alinhada na margem continental, se passa para pluma β planetária zonal, em mar aberto. Segundo Kida *et al.* (2007) a existência de *eddies*, sobrepostos ao escoamento médio, gerados por instabilidades baroclínicas e ou por alterações do declive da margem continental, são suficientes para que da pluma β* topográfica se liberte escoamento para o largo, cruzando as batimétricas, onde as profundidades deixam de controlar a VP, passando esta a ser controlada pela vorticidade planetária (efeito β) e resulte pluma ou giro com dois ramos zonais. Também Lamas (2009) recorreu à equação da VP, decomposta em termos de escoamento médio e turbulento, para sugerir duas possibilidades externas de forçar escoamento médio, ao longo de isolinhas de VP, (i) por perda (ou ganho) de massa e (ii) por divergência de fluxo de VP induzida por *eddies*. No caso da CA e CCA a perda de massa associada ao fluxo descendente e *vortex stretching* cria uma pluma β*, orientada com a batimetria, a norte da perda de massa. A divergência de fluxo de VP por *eddies* ou *meddies* (associados à CV da margem ibérica) desviam o escoamento da pluma β* topográfica para o largo, cruzando a batimetria, onde a vorticidade planetária passa a controlar, desenvolvendo a pluma β planetária com as CA e CCA.

8. CONCLUSÃO

A relação de Sverdrup permite estimativa razoável para o transporte associado à pluma β* topográfica, mas não para o da β planetária. A partir da geostrofia e da continuidade chega-se a equações para a pluma β planetária, em camada ativa ou oceano superior, bem como a circulação ciclónica composta pelas CA e CCA, forçada pelo *vortex stretching* associado à MOW, no golfo de Cádis. A dinâmica de propagação para oeste das ondas Rossby é possível explicação para o desenvolvimento em longitude das CA e CCA. Apoiado em Kida *et al.* (2007) e Lamas (2009), com argumentos de conservação da VP quase-geostrófica, salienta-se o papel dos *eddies*, projetando o escoamento a cruzar as batimétricas do talude continental, na transição da pluma β* topográfica para a pluma β planetária.

Agradecimentos

Agradeço à Escola Naval por proporcionar o tempo e a motivação para as atividades de investigação e ensino de Oceanografia. Ao professor Miguel Bento Moreira agradece-se a dedução da expressão para a pluma β planetária.

REFERÊNCIAS

Juliano, M. F. e Alves, M. L. R. (2007). *The Atlantic Subtropical Front / Current System of Azores and St. Helena*, Journal of Physical Oceanography, vol. 37, November 2007, pp. 2573-2598.

Kida, S., Price, J. F. e Yang, J. (2007). *The upper-oceanic response to overflows: a mechanism for the Azores Current*, Journal of Physical Oceanography, vol. 38, pp. 880-895.

Lamas, L. A. S. (2009). *Estimativas de transporte na parte oriental da Corrente dos Açores*, tese de mestrado em Ciências Geofísicas, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 38 pp.

Mauritzen, C., Morel, Y. e Paillet J. (2001). *On the influence of Mediterranean Water on the Central Waters of the North Atlantic Ocean*. Oceanographic Research Papers, vol 48, pp. 347-381.

Ozgokmen T. M., Chassignet E. P. e Rooth, C. G. H. (2001). *On the Connection between the Mediterranean Outflow and the Azores Current*, American Meteorologic Society, pp. 461-480.

Vallis, G. K. (2006). *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics – Fundamentals and Large Scale Circulation*, Cambridge University Press, 773 pp.

Volkov, D. L. e Fu, L. (2010). *On the Reasons for the Formation and Variability of the Azores Current*, Journal of Physical Oceanography, vol. 40, October 2010, pp. 2197-2220.

Comparação de dados entre a boia ondógrafo de Leixões e outros registos/modelações

T. Abreu (1), P. Baptista (2), A. Bouzas (2), P.A. Silva (2), C. Ferreira (2) e C. Bernardes (2)

(1) CESAM & Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP-IPP). taa@isep.ipp.pt.

(2) CESAM & Universidade de Aveiro.

Resumo: O conhecimento da agitação marítima é essencial para o planeamento e gestão das zonas costeiras. Embora exista um conjunto importante de observações por boias ondógrafo na costa portuguesa, por vezes, as séries temporais apresentam lacunas de dados. O preenchimento das lacunas pode ser efetuado recorrendo a dados de outras boias ou a dados simulados, mas é necessário aferir a qualidade desses dados para os diferentes regimes de ondulação. Com vista ao preenchimento futuro de lacunas da boia de Leixões, este trabalho compara, para um determinado horizonte temporal, os valores observados com valores gerados pelos modelos de agitação Wavewatch III e WAM. A comparação é alargada a observações da boia ondógrafo de Silleiro, na costa norte espanhola. Os parâmetros analisados reportam a altura significativa de onda, o período de pico, e a direção associada ao pico do espectro.

Palavras-chave: agitação marítima, boia ondógrafo, observações, estimativas, lacunas.

1. INTRODUÇÃO

O planeamento e gestão de zonas costeiras envolve o conhecimento da agitação marítima a que estão sujeitas. Reconhece-se que as zonas costeiras mais expostas a eventos de forte agitação marítima e de grande sobre-elevação meteorológica podem sofrer fortes impactos (*e.g.*, Ferreira, 2005). Para esse efeito, é possível recorrer a conjunto de dados medidos (boias ondógrafos). A utilização de modelos numéricos de propagação da agitação marítima e de morfodinâmica costeira (*e.g.*, modelos de linha de costa) requer também como entrada séries de dados completas de parâmetros de agitação marítima.

Embora se reconheça a importância de medições, por vezes, estes apresentam lacunas nas séries temporais quando a boia se encontra inoperacional. O preenchimento das lacunas pode ser efetuado, recorrendo a dados de outras boias ou a dados simulados. Todavia, é de extrema importância apurar a qualidade das previsões ou de outras observações nos diferentes regimes de ondulação (*e.g.*, Pilar *et al.*, 2008).

Com vista ao preenchimento de lacunas da boia ondógrafo de Leixões, pretende-se realizar uma validação dos valores medidos com os gerados por dois modelos de agitação: Wavewatch III (WW3) e WAve Model (WAM). A comparação é alargada a dados observados pela boia ondógrafo de Silleiro, localizada na costa norte espanhola.

2. METODOLOGIA

Nesta análise, efetua-se uma comparação entre os dados da boia ondógrafo de Leixões (*Lx*), a de Cabo Silleiro (Boia 2248 – *Si*) e as estimativas dos modelos WAM (1044065) e WW3. As localizações das boias, bem como dos pontos das malhas computacionais considerados, encontram-se referenciadas na Tabela I e na Figura 1. Depreende-se que os resultados dos modelos concernem localizações próximas da boia de Leixões, com a exceção da boia de Silleiro localizada mais a norte. Assinala-se ainda que esta boia regista dados para maiores profundidades (≈ 600 m).

Tabela I. Localização de referência dos dados e respetivos intervalos disponíveis para análise.

Dados	Coordenadas	Prof. (m)	Dados utilizados
Leixões	41°19'00"N, 8°59'00"W	83	07/2002 – 12/2015
Silleiro	42°07'12"N, 9°25'48" W	600	07/1998 – 04/2016
WW3	41°18'00"N, 9°00'00"W	85	11/2012 – 01/2015
WAM	41°15'00"N, 9°00'00"W	83	01/1958 – 07/2015

Para este estudo, consideraram-se os parâmetros espectrais de agitação marítima mais relevantes, nomeadamente, a altura significativa, *Hm0*, o período de pico, *Tp*, e a direção, *ThTp*, associada ao pico do espectro.

Os dados da boia de Silleiro e estimativas do modelo WAM foram cedidos pela entidade espanhola *Puertos del Estado (OPPE)* que opera conjuntamente com a *Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)*.

Os dados do modelo WW3 foram obtidos a partir de um modelo operacional disponível no sítio da internet http://climetua.fis.ua.pt/, desenvolvido pelo

Grupo de Meteorologia e Climatologia da Universidade de Aveiro. A Tabela I permite concluir que a comparação simultânea dos dados disponíveis pelo modelo WW3 limita o período de análise a 3 anos. Em particular, esse período encontra-se compreendido entre 14/11/2012 e 12/01/2015.

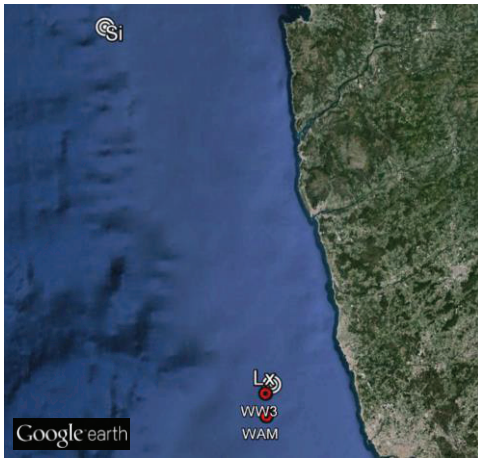


Fig. 1. Localizações das boias e dos pontos de onde se extraíram os dados dos modelo WAM e WW3.

Assinala-se que a frequência de aquisição dos dados da boia de Leixões é variável. Os registos tri-horários reportam situações de funcionamento normal. Em situação de tempestade os registos são praticamente contínuos sendo espaçados por pequenos intervalos de tempo (20 a 30 minutos) necessários ao processamento em tempo real (Costa *et al.*, 2001). Para esta análise, desprezaram-se todos os dados que não apresentavam correspondência de hora de medição entre as quatro séries temporais ou houvesse falhas de registos de algum dos parâmetros. Como resultado, obteve-se um total de 6800 registos horários diferentes para comparação.

3. RESULTADOS

3.1. Regime de agitação marítima

Para o período referido, na Figura 2 apresentam-se os histogramas de comparação das frequências de ocorrência dos registos de *Hm0*, *Tp* e *ThTp* na boia de Leixões, de Silleiro e dos modelos WAM e WW3. De uma forma geral, os dados medidos e estimados seguem tendências semelhantes, para os vários parâmetros.

O histograma de altura significativa, *Hm0*, evidencia que o regime de agitação é caracterizado, essencialmente, por ondas entre 1 e 2 m, com frequências relativas próximas de 30 %. Ondas com altura significativa superior a 5 m apresentam uma frequência relativa baixa, de apenas 10 % dos casos. A curva de frequência acumulada dos dados de Silleiro sugere um ligeiro afastamento das restantes.

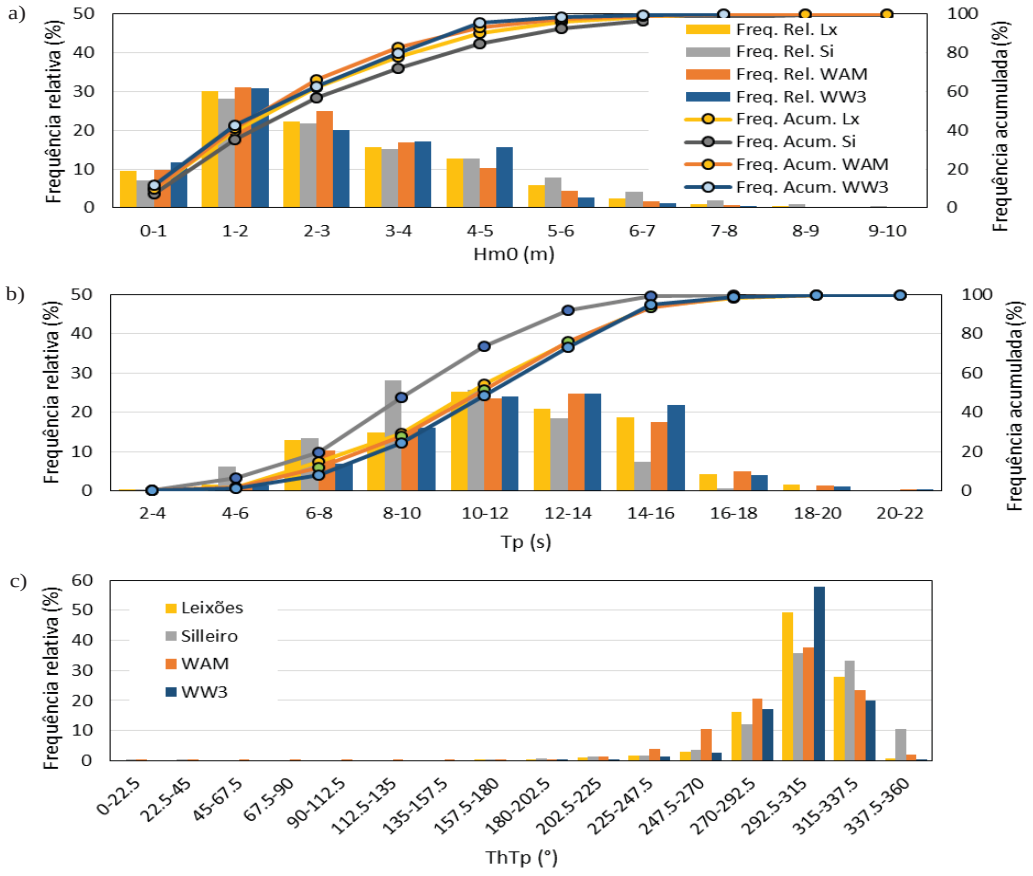


Fig. 2. Histogramas da comparação da frequência de Hm0, Tp e ThTP entre os dados registados pelas boias de Leixões (Lx) e Silleiro (Si) e os dados estimados pelos modelos WAM e WW3.

Não obstante, todos os regimes de *Hm0* são caracterizados por uma distribuição de Rayleigh, pois as alturas mais baixas apresentam uma frequência maior comparativamente às alturas mais elevadas.

Relativamente ao período de pico *Tp*, observa-se uma maior diferença com os dados da boia de Silleiro. Esta apresenta uma maior percentagem de medições no intervalo [8,10]s, resultando num ligeiro desajuste da curva de frequências acumuladas, relativamente às outras. Assinala-se ainda que a boia de Silleiro não apresenta, praticamente, registos de *Tp* superiores a 16 s.

O histograma e distribuição da frequência relativa da direção média associada ao período de pico, *ThTp*, evidencia a predominância de direções de onda entre 292.5° e 337.5°, com mais de 60 % de ocorrências. No entanto, assinalam-se diferenças da distribuição de frequência relativa entre essas duas classes ([292.5,315]° e [315,337.5]°) para as quatro séries temporais.

3.2. Comparação com dados da boia de Leixões

Para as quatro séries temporais é possível estabelecer relações empíricas entre as variáveis estudadas. A vantagem do conhecimento dessas relações prende-se com a colmatação de lacunas existentes em dados observados.

Da Figura 3 à 5 apresentam-se gráficos de dispersão para as três variáveis *Hm0*, *Tp* e *ThTp*, respetivamente. A comparação é estabelecida entre os dados da boia de Leixões e as outras três séries temporais. A densidade de pontos é assinalada com uma gradação de cores que varia entre o vermelho (maior densidade) e o azul (menor densidade). Indica-se ainda a regressão linear associada a cada gráfico de dispersão, bem como os respetivos coeficientes de determinação, R^2.

A comparação dos dados das duas boias para a altura significativa de onda (Figura 3) revela um valor elevado do coeficiente de determinação (R^2=0.94). Isso reflete um ajuste muito bom entre os dados observados. As diferenças entre a boia de Silleiro e de Leixões ocorrem para valores mais elevados de *Hm0* (ver também as diferenças observadas na Figura 2a para as classes de *Hm0* superiores a 4-5m), podendo dever-se à diferença de profundidades a que estão colocadas (83 e 600 m). As ondas que apresentam maior altura significativa de onda tendem a ter períodos maiores e, consequentemente maiores comprimentos de onda ocorrendo dissipação de energia à medida que se propagam na plataforma continental. Nessas circunstâncias, existe um melhor acordo entre os valores de *Hm0* de Leixões com os resultados dos modelos, uma vez que os valores estimados reportam profundidades sensivelmente semelhantes. As estimativas dos modelos WAM e WW3 evidenciam valores elevados de R^2 (=0.92 e 0.93, respetivamente), mas ligeiramente inferiores ao da boia de Silleiro (R^2=0.94).

Para o período de pico, *Tp*, observa-se uma maior dispersão dos pontos (Figura 4). Isso reflete-se numa redução dos valores do coeficiente de determinação para a ordem de $R^2 \approx 0.7$. Neste caso, a comparação com o modelo WW3 indicia um melhor ajuste, apresentando R^2=0.75.

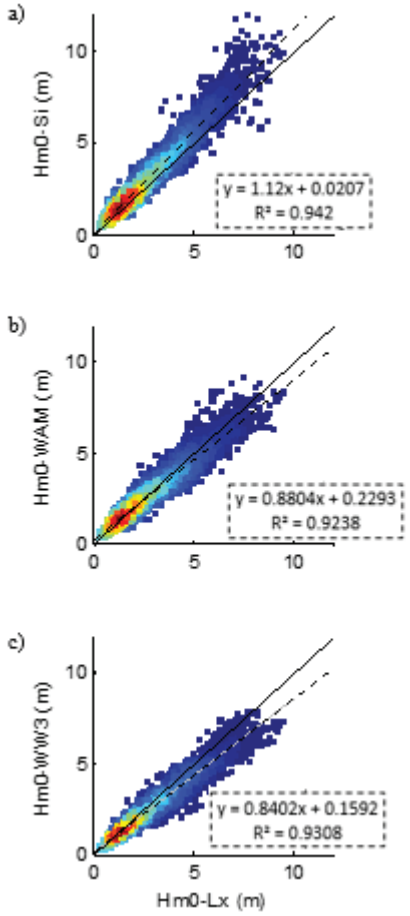


Fig. 3. Dispersão dos pontos para Hm0 em Leixões (Hm0-Lx) e (a) Silleiro (Hm0-Si), (b) WAM (Hm0-WAM) e (c) WW3 (Hm0-WW3). Reta de regressão linear e coeficiente de determinação R².

Relativamente à direção *ThTp*, observa-se uma redução significativa da correlação para as várias séries temporais. O melhor ajuste (R^2=0.64) é conseguido comparando os dados de Leixões com as estimativas do modelo WW3. Contudo, assinala-se que o ajuste com os dados da boia de Silleiro pode ser melhorado se se adicionar 360º a todos os dados da boia de Silleiro com valores de *ThTp* inferiores a 50º. De facto, essa boia apresenta uma maior gama de direções e, após essa correção, o coeficiente de determinação aumentaria para R^2=0.56. Apesar dessa ligeira melhoria, pode-se concluir que o ajuste do parâmetro direcional *ThTp* é o que apresenta menor correlação com os dados de Leixões.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho procura aferir a qualidade dos dados observados pela boia ondógrafo de Leixões com

outros valores gerados pelos modelos de agitação WW3 e WAM. A comparação é alargada a dados medidos da boia ondógrafo de Silleiro, localizada na costa norte espanhola. A análise das séries temporais reporta um período compreendido entre 2012 e 2015 e os parâmetros de agitação marítima analisados são a altura significativa de onda, o período de pico e a direção associada ao pico do espectro.

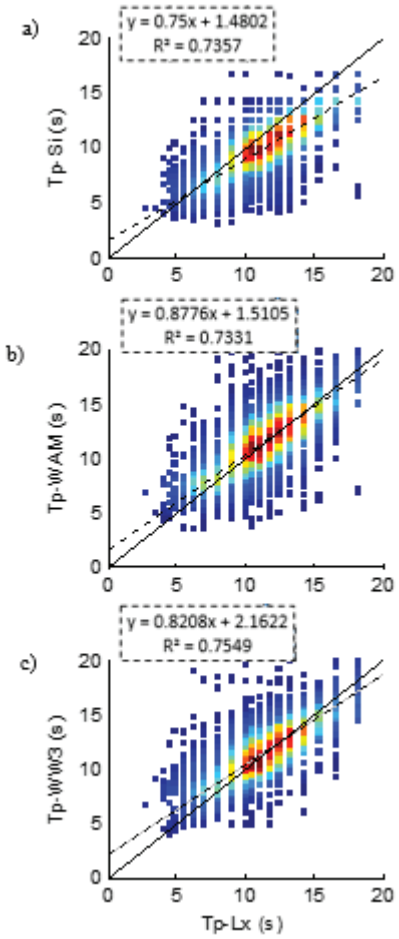


Fig. 4. Dispersão dos pontos para Tp em Leixões (Tp-Lx) e (a) Silleiro (Tp -Si), (b) WAM (Tp -WAM) e (c) WW3 (Tp -WW3). Reta de regressão linear e coeficiente de determinação R².

Os resultados evidenciam uma forte correlação entre os dados observados pelas duas boias (Leixões e Silleiro), particularmente para a altura significativa de onda. Para o período de pico a melhor comparação ocorre para as estimativas do modelo WW3. A correlação diminui consideravelmente para a direção associada ao pico do espectro e, novamente, o modelo WW3 providencia um melhor ajuste às observações de Leixões.

Para o horizonte temporal analisado, o preenchimento das lacunas das séries temporais pode ser efetuado utilizando curvas de regressão como as obtidas ou recorrendo aos valores estimados próximos da boia de Leixões.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado por fundos europeus, através do COMPETE e por fundos nacionais através da Fundação Ciência Português (FCT) no âmbito dos projetos PEst-C/MAR/LA0017/2013 e UID/AMB/50017/2013. Agradece-se ainda a cedência gratuita de dados de agitação marítima da entidade espanhola *Puertos del Estado (OPPE)* que opera conjuntamente com a *Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)*.

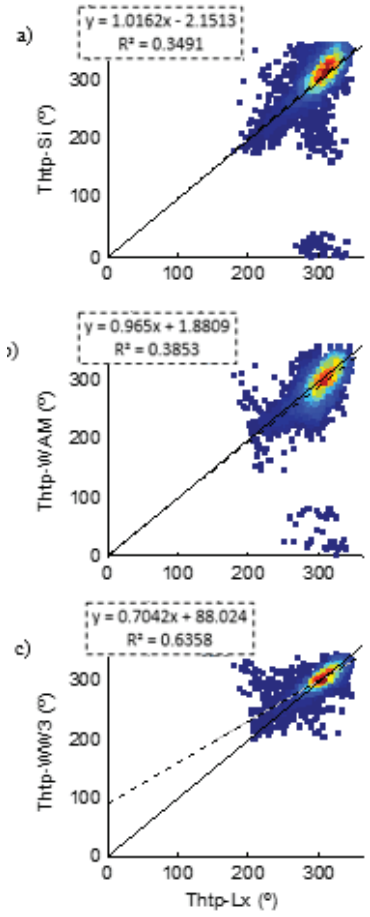


Fig. 5. Dispersão dos pontos de ambas as amostras para o parâmetro Thtp em Leixões (Thtp -Lx) e (a) Silleiro (Thtp -Si), (b) WAM (Thtp -WAM) e (c) Thtp (Hm0-WW3). Reta de regressão linear e coeficiente de determinação R².

REFERÊNCIAS

Costa, M., Silva, R., e Vitorino, J. (2001). Contribuição para o estudo do clima de agitação marítima na costa portuguesa. *2.as Jornadas Engenharia Costeira Portuguesas*, Sines.

Ferreira, O. (2005). Storm groups versus extreme single storms: predicted erosion and management consequences. *Journal of Coastal Research*, SI(42), 221–227.

Pilar, P., Soares, C., e Carretero, J. (2008). 44-year wave hindcast for the North East Atlantic European coast. *Coastal Engineering*, 55(11), 861–871.

Detecting the surface signature of eastern Atlantic low-level coastal jets with ASCAT

Isabel T. Monteiro (1), J. Stander (2) A. Lourenço (1), C. Barroso and N. Moreira (1)

(1) IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera - Rua C ao Aeroporto 1749-077 Lisboa; isabel.monteiro@ipma.pt.

(2) SAWS - South African Weather Service.

Abstract: The eastern Atlantic Ocean wind regime is frequently influenced by the presence of semi-permanent subtropical high pressure systems, the Saint Helena and the Azores anticyclones, and thermal lows over the arid continents. In the eastern flank of these high pressure cells low-level coastal jets (LLCJ) develop due to the thermal wind dynamics and the boundary created by the heated continent - the Southern African, the Northern African and the Iberian-Peninsula LLCJ. Surface wind speed and direction estimates over the global ocean are continuously provided by the Advanced Scatterometers (ASCAT) onboard MetOp satellites. Recent advancements in satellite data processing have allowed a finer footprint, of approximately 35 km, for 12.5 km products (ASCAT12), and within the range of 15-20 km for the 12.5 km coastal product (ASCAT-coastal). These improvements allowed further investigation of the coastal winds properties. In the present study LLCJ conditions in Southern Africa, Northern Africa and Western Iberia are investigated using. ASCAT wind products and ECMWF operational model analysis. The use of ASCAT12 and ASCAT-coastal allows to confirm the presence of a high wind speed area (≥12 ms-1) consistent with the surface signature of LLCJ. The ECMWF analysis is used to characterize the 3D characteristics of the low flow during these events.

Key words: Low-level coastal jet, ASCAT, high wind speed region, North Atlantic, South Atlantic.

1. INTRODUCTION

The wind conditions of the east Atlantic Ocean are frequently influenced by the presence of a semi-permanent subtropical high pressure systems, the Saint Helena and the Azores anticyclones, and thermal lows over the arid continents. The surface pressure gradient established induces equatorward winds which drives the upwelling of cold waters along the coast. Both, the North Atlantic and the Benguela upwelling regions are among the world largest eastern boundary current systems.

2. METHODS AND DATA

Following Ranjha et al. (2013) criteria a LLCJ is considered when:

(i) the jet maximum occurs in the first 2000 m above the surface; (ii) the wind speed at the jet maximum is at least 20% higher than at the surface; (iii) the wind speed above the jet maximum decreases to below 80% of that at the surface within 5 km above the maximum; (iv) a temperature inversion exists; and, (v) the temperature inversion is not a surface based inversion. The ASCAT-coastal l2b data at 12.5 x 12.5 km2 resolution is used. Flagging of land contaminated measurements, it is computed from the full resolution product (level1b) using ECMWF land mask at ~25 km resolution. The coastal product is able to compute winds as close as ~15 km from the coast (Verhoef et al., 2012). Buoy data were provided by Puertos Del Estado, Spanish automated stations. Wind speed and direction observations were taken at 3 m height. Observations from all buoys are hourly averages taken from 10-min measurements. For South Africa ships information was used for a qualitative assesement of the ASCAT estimation.

3. THE EAST ATLANTIC LLCJs

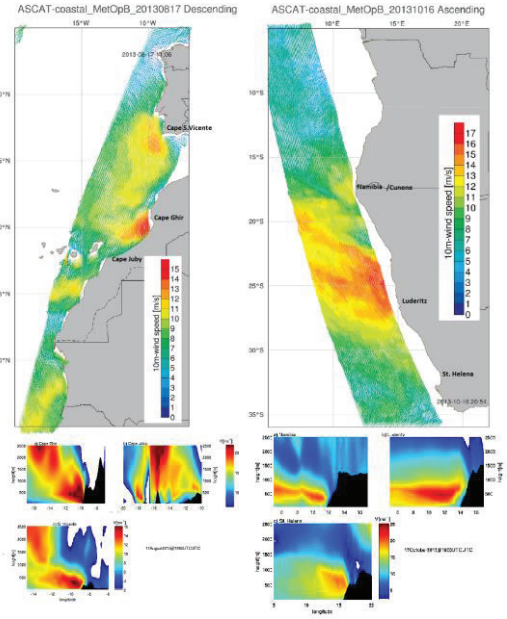


Fig. 1. Upper pannel: ASCAT-coastal 17-08-2013 descending and 16-10-2013 ascending MetOp-B passages.Lower panel: wind speed cross-sections from ECMWF 1800UTC analysis for, left panel 17-08-2013 in (a) C.Ghir; (b) C. Juby and (c) C. S. Vicente and right panel, 17-10-2013 in (a) Cunene/Namibia; (b) Luderitz and (c) St. Helena.

4. CONCLUDING REMARKS

ASCAT-coastal product reveals:

High speed regions,

≥10 ms^{-1} in W Iberia on 17 to 18 August 2013;

≥12 ms^{-1} in NE Atlantic on 17 to 18 August 2013;

≥12 ms^{-1} in SE Atlantic from 16 to 22 Oc2013;

Major wind speed maxima:

Downwind C. S.Vicente and C. Ghir, in NE Atlantic

Leeward Luderitz and Cunene River, in SE Atlantic.

ECMWF model allows the following conclusions:

In Western Iberia a LLCJ, from 17 to 18 August 2013. The jet height was <600 m at C. S.Vicente.

In North-Atlantic a LLCJ, from 17 to 18 August 2013.The jet height was <1000 m at C. Ghir. Canarias Islands introduce perturbations on the flow behaviour.

In Benguela a LLCJ from 16 to 22 October 2013. The jet height was <1500 m (at St. Helena) decreasing to 1000 m northward (River Cunene mouth). Due to the characteristic elevated plateau of southwestern Africa the jet is always located below the coastal topography.

It was concluded that in eastern Atlantic, the high wind speed region detected with ASCAT coastal product were the surface signature of low-level coastal jets.

Acknowledgements

Buoy data was obtained from Puertos Del Estado http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/

The ASCAT data for this paper is available were obtained at www.osi-saf.org.

REFERENCES

Ranjha, R., G. Svensson, M. Tjernstrom and A. Semedo, 2013. Global distribution of coastal low-level jets derived from ERA-Interim reanalysis. *Tellus*, 65, 20412,

Verhoef A., M. Portabella and A. Stoffelen, 2012. High-resolution ASCAT scatterometer winds near the coast. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 50, 7, 2481-2487.

Inundação das margens do estuário do Tejo: o caso da tempestade de fevereiro de 1941

A.B. Fortunato (1), P. Freire (1), X. Bertin (2), M. Rodrigues (1), M.L.R. Liberato (3, 4), e J. Ferreira (3)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, afortunato@lnec.pt.

(2) UMR 7266 LIENSs, CNRS - Université de La Rochelle, 2 rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle Cedex, França.

(3) Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), Vila Real, Portugal.

(4) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Resumo: A margem sul do estuário do Tejo é composta por extensas áreas com cotas baixas, logo suscetíveis a inundações. A determinação da perigosidade associada a estas inundações é por isso fundamental para a gestão territorial. Uma das mais graves inundações do último século ocorreu em 15 de fevereiro de 1941, existindo poucos dados quantitativos sobre o evento. Este trabalho vem colmatar esta lacuna através da implementação, validação e exploração de um conjunto de modelos numéricos que permitiu determinar a extensão da inundação da margem sul do estuário do Tejo, caso se repetisse um fenómeno semelhante, e determinar a importância relativa dos principais agentes forçadores nos níveis extremos neste estuário. Os modelos implementados incluem um modelo atmosférico à escala regional e local, modelos de agitação marítima e de circulação à escala regional, e um modelo acoplado de circulação e de agitação marítima à escala do estuário. Mostra-se também que a modulação do *setup* devido à agitação marítima na embocadura gera um sinal semi-diurno que é amplificado por ressonância no interior do estuário.

Palavras-chave: modelação numérica; inundação; processos físicos; eventos extremos.

1. INTRODUÇÃO

As inundações costeiras constituem uma das maiores catástrofes naturais, e são agravadas pela subida do nível médio do mar. O desenvolvimento de mapas de inundação é por isso muito útil para a gestão territorial, e tornou-se um imperativo legal na Europa com a Diretiva Europeia das Inundações.

Estes mapas são tipicamente produzidos através de modelos numéricos (e.g., Fortunato *et al.*, 2013, Webster *et al.*, 2014, Perini *et al.*, 2016). Geralmente simulam-se eventos extremos recentes (e.g., Dietrich *et al.*, 2010, Bertin *et al.*, 2014) que estão bem documentados, existindo dados para validar as simulações, e simulações de larga escala para forçar os modelos locais. No entanto, existem zonas em que os eventos recentes não são os mais gravosos. Nestes casos, simular eventos mais antigos pode fornecer informação muito relevante sobre possíveis eventos catastróficos. A recente disponibilidade de bases de dados de *hindcasts* atmosféricos, como o 20CR (Compo *et al.*, 2011), abre o caminho à simulação e análise de eventos históricos.

As margens do estuário do Tejo são particularmente vulneráveis a inundações (Tavares *et al.*, 2015). No entanto, as inundações recentes têm sido modestas relativamente à que ocorreu durante a tempestade de 15 de fevereiro de 1941, uma das cinco maiores tempestades que atingiu a Europa no século XX (Muir-Wood, 2011). Com pressões atmosféricas mínimas de 952 hPa em Lisboa, esta tempestade provocou dezenas de vítimas e grandes danos nas margens do estuário (Freitas e Dias, 2013).

Este trabalho visa, primeiro, avaliar a extensão da inundação no estuário do Tejo, em particular na zona da Lezíria de Vila Franca, caso ocorresse uma tempestade como a de 1941. As simulações são, por isso, efetuadas para as condições atuais. Avaliam-se também casos mais extremos, considerando uma subida do nível médio do mar de 0.5 m e a coincidência da tempestade com uma maré viva excecional. Dado que vários agentes físicos, atmosféricos, oceânicos e fluviais contribuem para a inundação, o segundo objetivo do estudo é determinar a importância relativa dos diferentes agentes forçadores nos níveis extremos.

A zona de estudo cobre o Atlântico Norte, no qual se simula a dinâmica da atmosfera e a geração da agitação marítima. As marés e as sobrelevações de origem atmosférica são simuladas no Atlântico NE. No estuário do Tejo simula-se a circulação e a agitação marítima acopladas.

2. DADOS

Utilizam-se os mais recentes dados topo-batimétricos, fornecidos por várias entidades

(Fig. 1). A montante de Vila Franca, uma vez que só existem perfis transversais espaçados de 2.5 km, consideram-se secções retangulares, com uma profundidade linearmente variável (Fig. 2).

Os dados de caudal afluentes ao estuário foram estimados com base em medições de 1941 em Vila Velha de Rodão, e corrigidos para ter em conta a sua variação entre esta estação e a fronteira de montante do estuário. Dada a incerteza na determinação dos caudais, efetuou-se uma análise de sensibilidade aos caudais (Fortunato *et al*., em prep.). Finalmente, os dados de níveis utilizados na validação do modelo são os descritos em Fortunato *et al*. (1999).

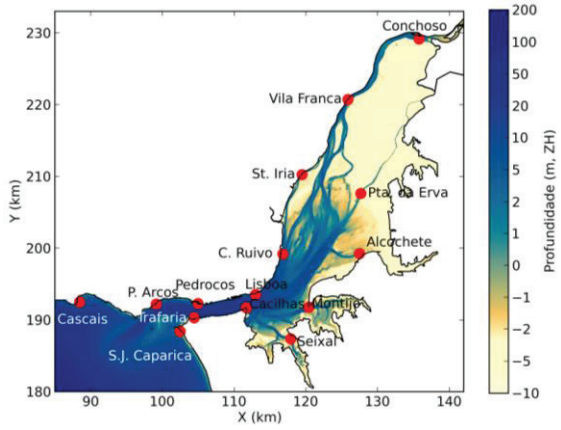


Fig. 1. Batimetria do estuário do Tejo sobre a malha de cálculo.

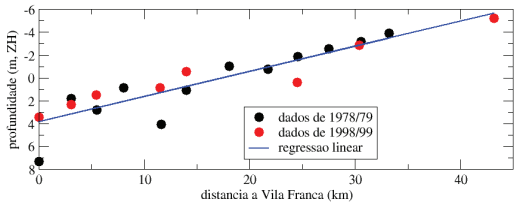


Fig. 2. Determinação da profundidade média do estuário a montante de Vila Franca.

3. MODELOS

O vento e a pressão atmosférica são simulados com o modelo WRF-AR (Skamarock *et al*., 2008) usando duas malhas encaixadas com resoluções de 27 km e 9 km na horizontal e 32 camadas verticais. As condições iniciais e de fronteira provêm da base de dados CR20 (Compo *et al*., 2011). Uma descrição detalhada da aplicação do modelo é apresentada em Ferreira *et al*. (2014).

A agitação marítima no Atlântico é simulada com o modelo WaveWatchIII (Toolman, 2009) com uma resolução de 0,5º. Os espectros são resolvidos com 24 frequências e 24 direções. O gelo é tido em conta de acordo com o procedimento descrito em Bertin *et al*. (2013). Os termos fonte e de dissipação são descritos em Bidlot *et al*. (2007).

Os níveis devidos à maré e agentes atmosféricos são simulados no Atlântico NE com o modelo SCHISM (Zhang *et al*., 2016). A malha tem uma resolução de 250 m na costa Portuguesa. A aplicação está descrita em Fortunato *et al*. (2016).

Finalmente, a circulação e a agitação marítima são simuladas de forma acoplada com o modelo SCHISM-WWM (Roland *et al*., 2012). A malha de cálculo (Fig. 3a) tem cerca de 140 000 nós e uma resolução da ordem de 20-30 m no interior do estuário. Colocar nós ao longo do coroamento dos diques (Fig. 3b) garante a correta reprodução da topografia nos locais mais críticos. Uma validação detalhada do modelo (e.g., Fig. 4) mostra que este consegue reproduzir corretamente a inundação em eventos extremos (Fortunato *et al*., em prep.).

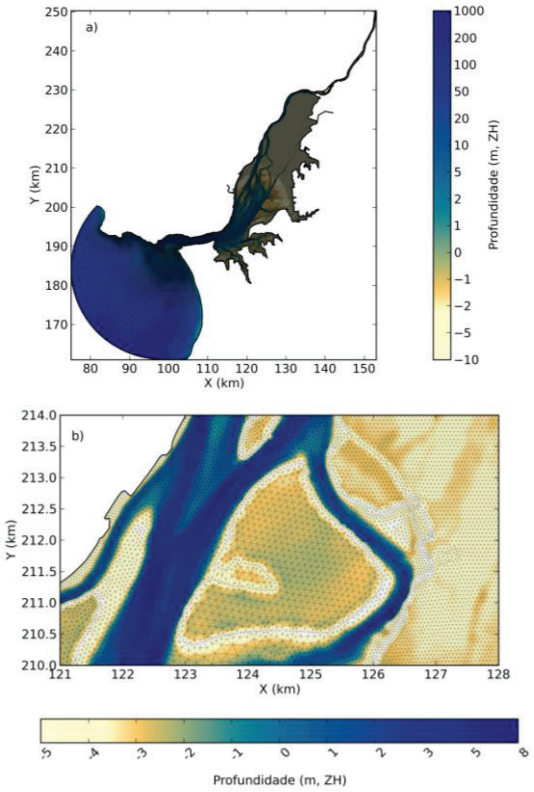


Fig. 3. Malha de cálculo (a) e detalhe na zona da Lezíria o mouchão do Lombo do Tejo (b).

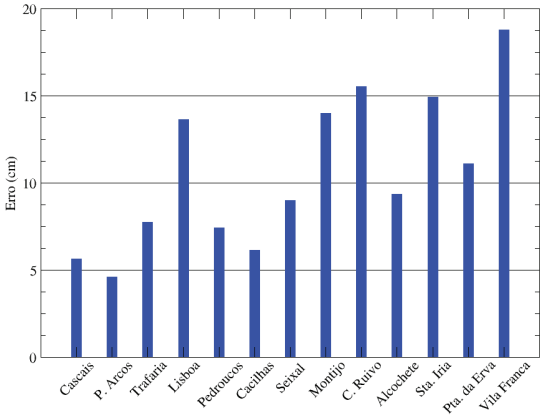


Fig. 4. Validação: erros quadráticos médios em preia-mar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados (Fig. 5a) mostram que uma tempestade semelhante à de 1941 causaria hoje algumas inundações na zona Sudoeste da Lezíria do Tejo. A zona do dique que foi galgada durante a

tempestade Xynthia (2010), a norte do mouchão do Lombo do Tejo, seria de novo galgada, apesar de ter sido alteada após esta tempestade. No entanto, a área inundada seria pequena, devido à existência de um segundo dique (Fig. 3b). Ocorreriam também inundações nos mouchões de Alhandra e da Póvoa. Estes problemas poderiam ser agravados se a maré tivesse maior amplitude. Nesse caso, a inundação incluiria também o mouchão da Póvoa, e o segundo dique da Lezíria seria também galgado (Fig. 5b). Finalmente, uma subida do nível médio do mar de 0.5 m agravará o problema significativamente: vastas zonas poderão ser inundadas nas margens esquerdas do Tejo e do Sorraia (Fig. 5c), apesar da proteção por diques.

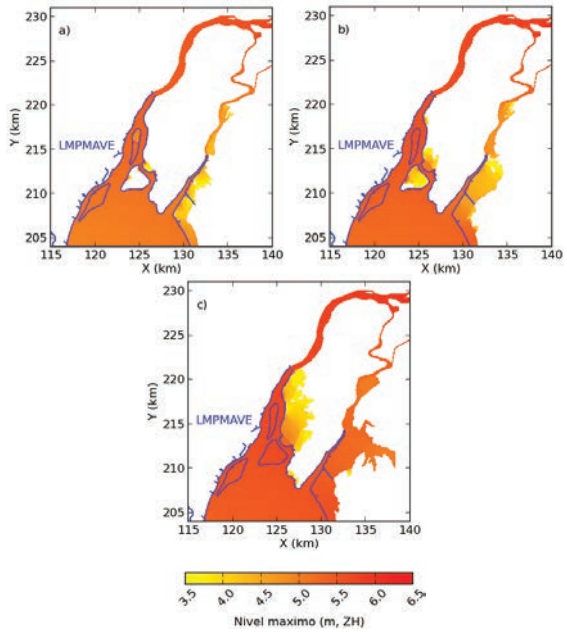


Fig. 5. Inundações na zona da Lezíria para a tempestade de 1941: a) simulação base; b) caso atual mais gravoso; c) subida do nível médio do mar de 0.5 m. A linha a azul representa a máxima preia-mar de águas vivas equinociais.

Várias simulações foram efetuadas para determinar as causas das sobrelevações ao longo do estuário (Fig. 6). Em geral, os resultados mostram que as sobrelevações crescem significativamente ao longo do estuário. Este crescimento não se deve à sobrelevação de origem meteorológica, que se mantém aproximadamente constante ao longo do estuário. Esta tem um período característico de cerca de um dia, não sendo por isso afetada pelo fenómeno de ressonância que amplifica as constituintes diurnas (Fortunato *et al*., 1997). Pelo contrário, a sobre-elevação devida à agitação marítima, também significativa, cresce ao longo do estuário. A agitação marítima na embocadura do Tejo é modulada pela maré (Rusu *et al*., 2011), gerando por isso um *setup* com uma variabilidade semi-diurna. É este sinal que é amplificado no interior do estuário, explicando parcialmente o crescimento da sobrelevação total. Da mesma forma, o efeito do vento cresce no interior do estuário.

O efeito do caudal fluvial apenas é relevante na zona estreita do estuário, como mostrado anteriormente por Vargas *et al*. (2008). Os gradientes de pressão atmosférica e as ondas geradas localmente têm pouca expressão nos níveis máximos.

Finalmente pode existir uma diferença apreciável entre a sobrelevação total e a soma dos efeitos individuais. Esta diferença explica-se pelas interações não lineares entre os diferentes processos. Guerreiro *et al*. (2015) mostrou que o período de ressonância do estuário cresce com a subida do nível do mar, aumentando assim a amplificação dos sinais semi-diurnos. Da mesma forma, a subida do nível do estuário vai levar à amplificação de diferentes sinais, e o da maré em particular.

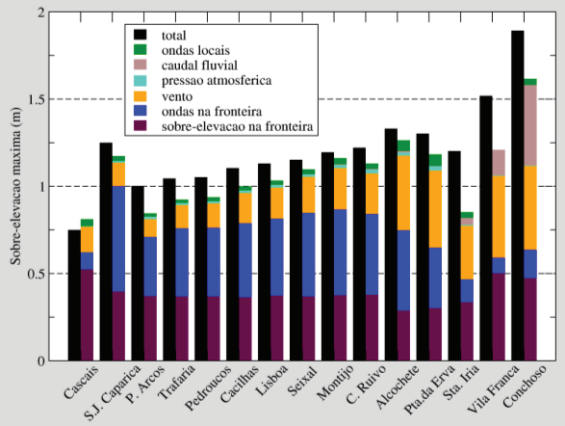


Fig. 6. Importância dos diferentes processos físicos ao longo do estuário.

5. CONCLUSÕES

O projeto BINGO (*Bringing INnovation to onGOing water management - a better future under climate change*) visa proporcionar conhecimento e ferramentas a vários *stakeholders* para lhes permitir lidar com eventos extremos, incluindo cheias e secas. O presente trabalho contribui para um dos casos de estudo deste projeto, o Tejo, identificando as zonas que poderão ser inundadas em caso de um evento extremo.

Os resultados mostram que várias zonas agrícolas da zona superior do estuário estão em risco de submersão, apesar de estarem protegidas por diques.

Estas inundações são causadas por diferentes agentes físicos que causam uma sobrelevação do nível da água que se sobrepõe à maré. A sobrelevação do nível do mar devido à pressão atmosférica e ao vento, e o *setup* devido às ondas são os dois principais agentes na generalidade do estuário. Para montante, os efeitos dos ventos locais e do caudal fluvial são também relevantes. A modulação pela maré do *setup* devido às ondas gera ainda um sinal semi-diurno que é amplificado no interior do estuário por ressonância.

Agradecimentos

Agradece-se o financiamento da Comissão Europeia, projeto H2020 BINGO (*Grant agreement n.* 641739), e da FCT (MR: bolsa SFRH/BPD/87512/2012; MLRL e JF: projeto STORMEx, FCOMP-01-0124-FEDER-019524; PTDC/AAC-CLI/121339/2010). Este trabalho tirou partido da rede nacional de computação (INCD). Agradece-se o fornecimento de dados pelo IH, APA, APL, DGT, IPMA, ABLGVFX e EMODNET.

REFERÊNCIAS

Bertin, X., Prouteau, E., & Letetrel, C. (2013). A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the 20th century. *Global and Planetary Change*, 106, 77-83.

Bertin, X., Li, K., Roland, A., Zhang, Y.J., Breilh, J.-F., & Chaumillon, E. (2014). A modeling-based analysis of the flooding associated with Xynthia, central Bay of Biscay. *Coastal Eng.*, 94: 80-89.

Bidlot, J.R., Janssen, P.A.E.M., & Abdalla, S. (2007). A revised formulation for ocean wave dissipation and its model impact, *Tech. Memo*, 509, 29.

Compo, G.P., Whitaker, J.S., Sardeshmukh, P.D., Matsui, N., Allan, R.J., *et al*. (2011). The twentieth century reanalysis project, *Quarterly J. of the Royal Meteorological Society*, 137: 1–28.

Dietrich, J.C., S. Bunya, J.J. Westerink, B.A. Ebersole, J.M. Smith, *et al*. (2010). A high-resolution coupled riverine flow, tide, wind, wind wave and storm surge model for Southern Louisiana and Mississippi: Part II – synoptic description and analysis of hurricanes Katrina and Rita. *Monthly Weather Rev.*, 138: 378-404.

Ferreira, J.A., Carvalho, A.C., Carvalheiro, L., Rocha, A., & Castanheira, J.M. (2014). On the influence of physical parameterisations and domains configuration in the simulation of an extreme precipitation event. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 68, 35-55.

Fortunato, A.B., Baptista, A.M., & Luettich, R.A. (1997). A three-dimensional model of tidal currents in the mouth of the Tagus Estuary. *Continental Shelf Res.*, 17(14), 1689-1714.

Fortunato, A.B., Oliveira, A., & Baptista, A.M. (1999). On the effect of tidal flats on the hydrodynamics of the Tagus estuary. *Oceanologica Acta*, 22(1), 31-44.

Fortunato A.B., Li K., Bertin X., Rodrigues M., & Miguez B.M. (2016). Determination of extreme sea levels along the Iberian Atlantic coast, *Ocean Engineering*, 111(1), 471-482.

Fortunato, A.B., Freire, P., Bertin, X., Rodrigues, M., Liberato, M.L.R, & Ferreira, J. (em preparação). A numerical study of the February 15, 1941 Iberian storm in the Tagus estuary.

Freitas J.G., Dias J.A. (2013). 1941 windstorm effects on the Portuguese Coast. What lessons for the future? *J. Coastal Res.*, Special Issue 65, 714-719.

Guerreiro M., Fortunato A.B., Freire P., Rilo A., Taborda R., *et al*. (2015). Evolution of the hydrodynamics of the Tagus estuary (Portugal) in the 21st century. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15/1: 65-80.

Muir-Wood, R., (2011). The 1941 February 15th Windstorm in the Iberian Peninsula. *Trébol*, 56, 4-13.

Perini, L., Calabrese, L., Salerno, G., Ciavola, P., & Armaroli, C. (2016). Evaluation of coastal vulnerability to flooding: comparison of two different methodologies adopted by the Emilia-Romagna region (Italy), *Natural Hazards and Earth System Science*, 16, 181-194.

Roland A., Zhang Y.J., Wang H.V., Meng Y., Teng Y.-C., *et al*. (2012). A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids. *J. Geophysical Res.*, 117, C00J33.

Rusu, L., Bernardino, M., Guedes Soares, C. (2011). Modelling the influence of currents on wave propagation at the entrance of the Tagus estuary, Ocean Engineering, 38: 1174-1183.

Skamarok, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., *et al*. (2008). A description of the advanced research WRF Version 3. *NCAR Technical Note*.

Tavares A.O., Santos P.P., Freire P., Fortunato A.B., Rilo A., *et al*. (2015). Flooding hazard in the Tagus estuarine area: the challenge of scale in vulnerability assessments. *Environmental Science & Policy*, 51: 238-255.

Tolman H.L. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH III, version 3.14. *NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276*, 194 p.

Vargas, C., Oliveira, F.S.B.F., Oliveira, A., & Charneca, N. (2008). Flood vulnerability analysis of an estuarine beach: application to Alfeite sand spit (Tagus Estuary). *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 8(1), 25-43.

Webster, T., McGuigan, K., Collins, K., & MacDonald, C. (2014). Integrated River and Coastal Hydrodynamic Flood Risk Mapping of the LaHave River Estuary and Town of Bridgewater, Nova Scotia, Canada. *Water*, *6*/3: 517-546. DOI:10.3390/w6030517.

Zhang Y.J., Ye F., Stanev E.V., Grashorn S. (2016). Seamless cross-scale modeling with SCHISM, *Oc. Modelling*. 10.1016/j.ocemod.2016.05.002.

Modelling tsunamis with a non-hydrostatic version of the MOHID model

João. C. Silva (1), António A. Pires Silva (1), Paulo. C. Leitão (2) and Adélio. J. Silva (2)

(1) CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av Rovisco Pais, 1. joao.c.da.silva@ist.utl.pt.

(2) HIDROMOD, Rua Rui Teles Palhinha, nº 4, 1º. 2740-278, Porto Salvo.

Abstract: Recent studies suggest the propagation and run-up of tsunamis can be strongly influenced by dispersion due to non-hydrostatic effects, which can result in up to 60% higher values of coastal run-up than the ones calculated by hydrostatic models. In this communication the validation of a non-hydrostatic version of MOHID model is presented. This version features a newly introduced pressure correction method. The validation process is based in the benchmarking methodology proposed by NOAA (http://nctr.pmel.noaa.gov/benchmark/), for numerical models aimed at the study of tsunami events. It consisted in running a battery of tests, with increasingly complex geometries, with the objective of comparing the numerical results with their analytical solutions, laboratory data or field data. These results include snapshots of the wave propagation, time series of surface elevations and inundation maps. Field (Tohoku tsunami), lab and analytic results are compared with MOHID results run in non-hydrostatic and hydrostatic mode.

Keywords: tsunami, MOHID, non-hydrostatic, NOAA.

1. INTRODUCTION

On 26 December 2004 the Boxing Day tsunami took the lives of over 225 000 people in countries around the Indian Ocean. This catastrophe strengthened the interest in the development of plans to mitigate the effects of future tsunamis in countries or regions susceptible to this kind of phenomena. These concerns are also shared by Portugal which through the Portuguese civil protection agency (Autoridade Nacional de Proteção Civil) tasked the company Hidromod, lda to delimit potential inundation areas of several regions of the Portuguese coast in the case of a tsunami event.

Traditionally this kind of studies have been mainly developed with the aid of hydrostatic models such as COMCOT, MOHID, TUNAMI-N2 and COMMIT/MOST. In this type of models the vertical accelerations are neglected and the hydrostatic approximation is applied to the vertical momentum equation. This is a valid approximation when the wavelength of the disturbance is much larger than the height of the water column, which often holds true for the case of tsunamis generated by sub-marine earthquakes.

However, studies following the Boxing Day tsunami suggest the evolution and run-up of tsunamis can be strongly influenced by dispersion due to non-hydrostatic effects. This can result in up to 60% higher values of coastal run-up than the ones calculated by models based on the non-linear shallow water equations (NSWE) (Cui *et al.* 2012), for example.

For the aforementioned reasons it was decided that this was a good opportunity to evaluate the added value of introducing non-hydrostatic capabilities in the MOHID modelling system.

Theias (2005) was the first to introduce a non-hydrostatic approach in MOHID following a method proposed by Casulli & Zanolli (2002). However, this method assumes a hydrostatic approach for the surface layer, which may result in an important limitation in some situations. To overcome this, a Keller-box approach was proposed by Stelling (Stelling & Zijlema, 2003) (Cui *et al.* 2012) in order to compute the non-hydrostatic pressure correction applied to a single layer (2D flow). This method showed to be very promising and was included in MOHID by Leitão (Leitão, 2016).

To determine whether this non-hydrostatic version of MOHID was reliable the model was submitted to a comprehensive validation process from which some of the results are presented below.

2. METHODOLOGY

The validation process of the non-hydrostatic model was based on a benchmarking methodology proposed by North American organization NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) designed for wave propagation models and applied to the simulation of tsunamis. The methodology is detailed in Synolakis *et al.* (2007).

All laboratory results and data used for setting up the tests in the numerical models can be found in NOAA's centre for tsunami research website, at http://nctr.pmel.noaa.gov/benchmark/ .

The bathymetries used in the numerical models were for the most part created based on the available descriptions of the laboratory experiments. For the test cases with more complex geometries, namely the Monai Valley experiment and Tohoku tsunami the resources were found online in NOAA's centre for tsunami research website for the first case and requested to the Korean Ocean Research and Development Institute (KORDI) for the second.

The initial conditions of solitary waves, namely elevation and velocity, were calculated using their respective equations presented in either Archambeau *et al.* (1999) or Staroszczyk (2011), depending on which profile fitted better the measured solutions and whether higher order equations were necessary to ensure the model's stability.

Each test case was ran in both the hydrostatic and non-hydrostatic versions of MOHID and the obtained results were compared with their respective analytic solution or recorded data (depending on the type of test) and are presented along with the spatial and time steps used in their simulations.

3. MODEL VALIDATION RESULTS AND ANALYSIS

3.1. Analytical benchmarking

In this battery of tests solitary waves of varying relative amplitude (A/h) were propagated along a constant depth channel.

In Fig. 1 and Fig. 2 are presented the results of the simulations for relative amplitudes of 0.125 and 0.5, respectively. As can be observed, the non-hydrostatic model is much more capable at maintaining the phase, amplitude and shape of the analytical solution than the hydrostatic model.

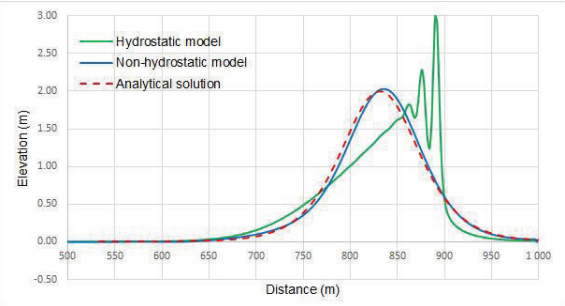


Fig. 1. Propagation of a solitary wave on a flat bottom cannel. A/h=0.125; spatial step=2 m; time step=0.05 s.

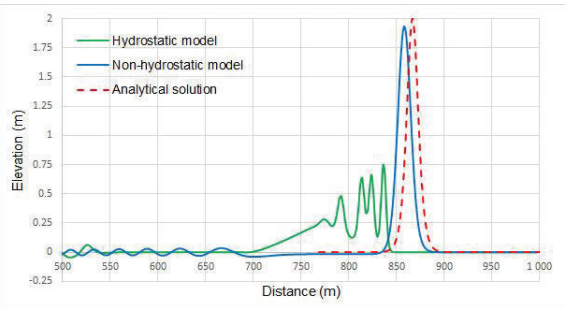


Fig. 2. Propagation of a solitary wave on a flat bottom cannel. A/h=0.5; spatial step=2 m; time step=0.01 s.

3.2. Laboratory benchmarking – Solitary wave on a simple beach

The objective of this set of tests was to reproduce the laboratory results obtained for the propagation of a solitary wave of varying relative amplitudes on a constant depth channel adjoining a sloping beach with a slope of 1:19.85.

In Figure 3 to Figure 5 are presented the results obtained for the propagation of a breaking wave with relative amplitude of 0.3. As can be observed, the hydrostatic model struggles to reproduce the wave profile obtained from the laboratory results and underestimates the maximum run-up. On the other hand, the non-hydrostatic model satisfactorily reproduces the maximum run-up and wave profile evolution for all cases except the instant shown in Figure 4. This suggests that the wave breaking module still needs further development.

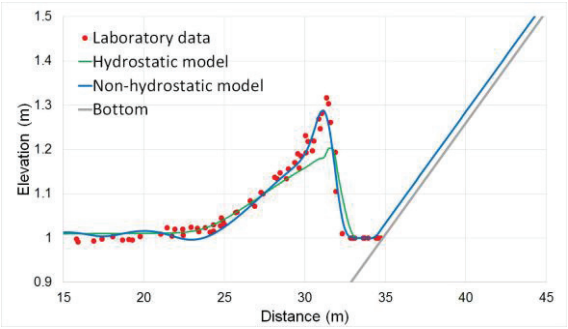


Fig. 3. Time evolution of a breaking a wave with A/h=0.3, for T=20. Spatial step=3 m. Time step=0.01 s.

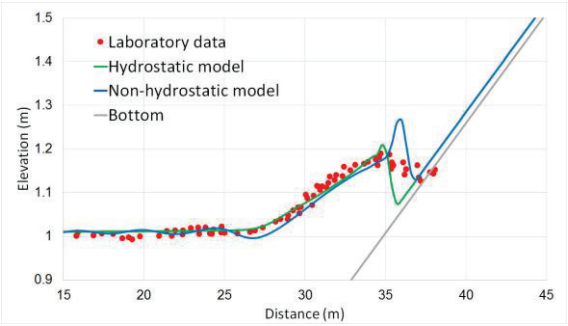


Fig. 4. Time evolution of a breaking a wave with A/h=0.3, for T=25. Spatial step=3 m. Time step=0.01 s.

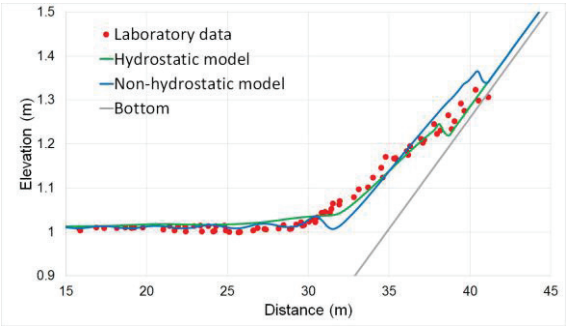


Fig. 5. Time evolution of a breaking a wave with A/h=0.3, for T=30. Spatial step=3 m. Time step=0.01 s.

3.3. Laboratory benchmarking – Solitary wave on a conical island

In this set of tests solitary waves of varying relative amplitude were propagated on a wave tank with a conic island at its centre. The island had the shape of a truncated, right circular cone with diameters of 7.2 m at the toe and 2.2 m at the crest. Its vertical height was approximately 62.5 cm with a slope of 1:4 on its beach face. The objective of the experiments was to study the run-up process of a tsunami.

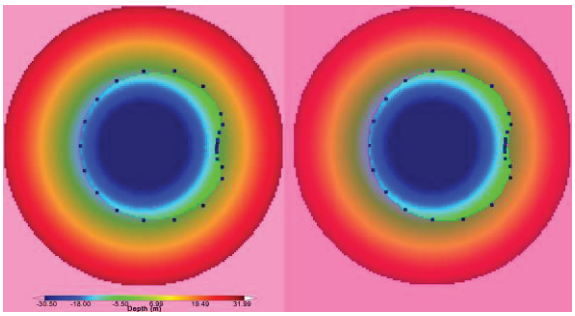


Fig. 6. Comparison of the maximum run-up around the conical island, for A/h=0.181, between the computed results for the non-hydrostatic (left) and hydrostatic (right) models and measured data (blue squares).

In Fig. 6 are presented the maximum run-up values around the conical island for a solitary wave of A/h=0.181, obtained using a 100:1 bathymetry of the physical model on a computational grid, a spatial step of 5 m and a time step of 0.01 s. Looking at the maximum run-up, at the front of the island the simulated results are well adjusted with the recorded data for both models. At the back side of the island the hydrostatic model underestimates the maximum run-up while the non-hydrostatic model has a good adjustment.

3.4. Laboratory benchmarking – Tsunami run-up onto a complex three dimensional beach, Monai Valley

This test was based on experimental data obtained in a wave tank modelled after Monai Valley, Japan, which was built in order to study the extreme run-ups observed near the village of Monai during the 1993 Okushiri tsunami. The detailed model bathymetry, imposed wave as well as a video of the experiment are hosted in NOAA's centre for tsunami research website.

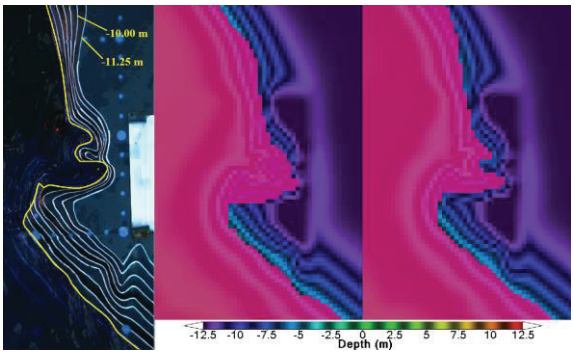


Fig. 7. Comparison of a screenshot of the Monai Valley experiment (left), with the maximum run-up-values obtained from the non-hydrostatic model (centre) and the hydrostatic model (right).

The bathymetry used in the numerical simulations was scaled by a factor of 100:1 in relation to the physical model. The spatial resolution in the x and y directions was of 1.4 m and the time step was 0.01 s.

Looking at the inundation maps in Fig. 7, in the video of the experiment the maximum observed run-up value is of approximately 10 m (in relation to the initial water level). When compared to the numerical models, the non-hydrostatic model produces the more accurate result with a simulated maximum run-up of 10.15 m against the 8.17 m simulated by the hydrostatic model.

3.5. Field benchmarking – Tohoku earthquake and tsunami

The Tohoku tsunami (Japan) was modelled using the hydrostatic version of MOHID by researchers at KORDI with the objective of studying its propagation and inundation as well as to examine MOHID's applicability for this type of simulations. The simulation conditions are detailed in Hyun *et al.* (2013). In order to replicate the study results a request was made to KORDI for the supply of tidal gauge data, fault parameters for generation of the initial water level condition and bathymetry. The initial water displacement was calculated following the fault plane model proposed by Okada (1985).

The simulated inundation maps for the Sendai plane, presented in Fig. 8, show no relevant differences between the hydrostatic and non-hydrostatic versions of MOHID. The observable and computed results seem to be fairly well matched, with inundation areas being mainly overestimated by the numerical models in the sections that present bigger disparities. The agreement between observable and computed data could be potentially improved by using a higher resolution numerical grid with topography that contemplated the pre-exiting structures, such as buildings and sea walls.

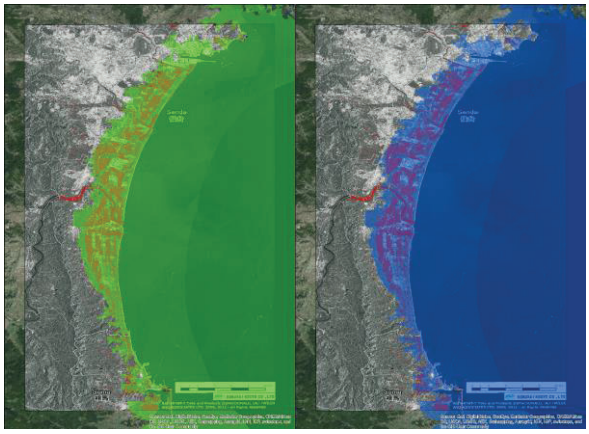


Fig. 8. Comparison of the observed inundated areas (red dots) with the inundation maps generated by the non-hydrostatic (left) and hydrostatic (right) models, for the Tohoku tsunami. The observed inundated areas were reproduced from RADARSAT satellite images hosted by Kokusai Kogyo Co., Ltd. (2011).

4. CONCLUSIONS

From the overall good results obtained for all the simulated test cases it may be concluded that the non-hydrostatic model appears to provide realistic solutions.

When compared to the hydrostatic version of MOHID, the non-hydrostatic model displayed much better results in the tests where the vertical acceleration component was more relevant, in particular the test cases for the higher values of relative amplitudes. In the experiments that were more similar to real tsunami events the difference between models was less dramatic. This can be explained by the fact that tsunami waves' propagation in the open sea can be approximated to the shallow water equations, which assume a small vertical velocity of the fluid (nearly hydrostatic). However, looking at the simple beach, conical island and Monai Valley experiments the non-hydrostatic model was consistently better at estimating the maximum run-up values. This is particularly relevant since the run-up is an important factor in the planning of mitigation measures against tsunami events.

Acknowledgements

The authors thank KORDI for kindly providing the data for the Tohoku tsunami simulations.

REFERENCES

Archambeau, F., Guimet, V., & Bastin, G. (1999). Application du prototype de module ALE du Solveur Commun à des cas de surface libre EDF, Technical report HE-41/99/054/A. Chatou, France: EDF Research and Development.

Casulli, V., & Zanolli, P. (2002). Semi-implicit numerical modelling of non-hydrostatic free-surface flows for environmental problems. Mathematical and Computer Modelling, 36, 1131-1149.

Cui, H., Pietrzak, J. D., & Stelling, G. S. (2012). Improved efficiency of a non-hydrostatic, unstructured grid, finite volume model. Ocean Modelling, 55-67.

Hyun, S.-K., Choi, J.-Y., Lee, D.-Y., & Cho, K.-H. (2013). Tohoku earthquake, tsunami and inundation with MOHID. M. Mateus, & R. Neves (eds.). Ocean modelling for coastal management – Case studies with MOHID. IST Press, Lisboa, 131-141.

Kokusai Kogyo Co., Ltd. (2011, June 19). Great East Japan Earthquake Archives Disaster on March 11, 2011 - Satellite images. Retrieved from Japan Asia Group Kokusai Kogyo Co., Ltd.:http://www.kkc.co.jp/english/service/bousai/csr/disaster/201103_touhoku/aerial.html.

Leitão, P. C. (2016, January 12). MOHID Hydrodinamic Module. Retrieved from Github: https://github.com/Mohid-Water-Modelling-System/Mohid/blob/master/Software/MOHIDWater/ModuleHydrodynamic.F90.

Okada, Y. (1985, August). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of Seismological Society of America, 75, 1135-1154.

Staroszczyk, R. (2011). Simulation of solitary wave mechanics by a corrected smoothed particle hydrodynamics method. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, 24-45.

Stelling, G., & Zijlema, M. (2003). An accurate and efficient finite-difference algorithm for non-hydrostatic free-surface flow with application to wave propagation. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1-23.

Synolakis, C., Bernard, E., Titov, V., Kânoğlu, U., & González, F. (2007). Standards, criteria, and procedures for NOAA evaluation of tsunami numerical models, NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-135. Seattle: NOAA/Pacific Marine Environmental Laboratory.

Theias, H. A. (2005). Numerical Modeling of Non-Hydrostatic Processes in Estuarine and Coastal Regions (Master's thesis). Lisboa: Instituto Superior Técnico.

Propagação de ondas em canal de largura variável – Modelação numérica

Diogo R.C.B. Neves (1,2), António A. Pires Silva (1), Conceição J.E.M. Fortes (2) e Jorge S. G. Matos (1)

(1) CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

(2) Laboratório Nacional de Engenharia Civil. dneves@lnec.pt.

Resumo: O presente trabalho visa estudar numericamente a influência de uma alteração da configuração em planta de um canal na propagação de ondas. Para tal, foi utilizado o modelo OpenFOAM® baseado nas equações RANS (*Reynolds –Averaged Navier-Stokes*). Foram realizadas simulações 2D e 3D para o caso de um canal de ondas de largura variável que configura um estreitamento do canal. Foi estudada a variação da altura de onda ao longo do canal e a variação do campo de velocidades nas suas componentes longitudinais e transversais (3D). Os resultados apresentam um aumento da altura de onda da simulação 3D em relação à 2D de 29% e, relativamente às velocidades, existem claras diferenças devidas ao estreitamento.

Palavras-chave: Propagação de onda, canal de ondas numérico, OpenFoam, RANS, estreitamento.

1. INTRODUÇÃO

Os estudos de propagação de onda e de interacção onda – estrutura em canal envolvem, normalmente, uma aproximação 2D, associada a uma configuração do canal de largura constante, ainda que com variações no perfil longitudinal do fundo.

Contudo, existem situações concretas que requerem a necessidade de estudos de propagação de onda em canal de largura variável. Nestes casos, existe um efeito tridimensional e o desenvolvimento da componente transversal do campo de velocidades. Como exemplo das situações acima referidas indicam-se as embocaduras de configuração confinada ou locais que foram artificialmente modificados pela actividade humana produzindo uma contracção ou expansão da secção transversal à propagação das ondas.

Existe apenas um número restrito de abordagens à propagação de ondas em zonas de fronteiras laterais de geometria variável. Chang et al. (1979) consideraram a propagação de ondas solitárias num canal de profundidade uniforme e de largura variável com o fim de avaliar a capacidade da equação de Korteweg-de Vries de reproduzir os valores experimentais. Benilov & Yaremchuk (1991) e Yoon & Liu, (1987) orientaram o trabalho para o estudo da reflexão de ondas devido a fronteiras laterais não uniformes no sentido de identificar a formação de ondas estacionárias e quantificar a ressonância. O objectivo último era aplicar estes resultados a estruturas de fronteira em zonas portuárias para atenuação da agitação marítima. Teng & Wu (1994) aplicam dois modelos teóricos, baseados nas equações de Boussinesq e Kortweg-de Vries, para o estudo de ondas longas em canais de geometria variável. Concluem que para a quantificação do efeito da variação da secção transversal do canal, o modelo associado à primeira equação apresentava um melhor comportamento do que o modelo apoiado na segunda. Apenas recentemente, Didier et al. (2010) realizou um estudo numérico que prova a influência do estreitamento lateral na propagação de ondas em canal. É de referir também a modelação da influência de batimetrias de largura variável na propagação de ondas internas aquando da aproximação à costa, como são os casos de Grimshaw et al. (2010) e Quaresma (2006). A propagação de ondas em canais de largura variável continua a ser um assunto muito pouco explorado pela comunidade científica.

Mais recentemente o avanço das capacidades computacionais e o desenvolvimento de ferramentas de hidráulica computacional permitiram a resolução das equações primitivas. Existe, assim, a possibilidade de simular fenómenos de complexidade elevada em tempo útil. Neste sentido, o presente trabalho mostra a aplicação de um modelo numérico de volumes finitos que resolve as equações de Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) com um método VOF (*Volume of Fluid*).

No presente trabalho é avaliada a influência do estreitamento gradual de um canal na propagação de ondas de gravidade de superfície. São apresentadas comparações para as alturas de ondas e campo das velocidades. As configurações ensaiadas dizem respeito a um canal perfeitamente retilíneo (2D) e um canal com troço de largura variável a representar um estreitamento (3D). São ainda apresentados os valores da componente transversal da velocidade referentes à situação da simulação 3D.

2. CASO DE ESTUDO

O canal de ondas numérico que foi utilizado nas simulações reproduz as características do canal de ondas COI3 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Este canal tem a particularidade de apresentar um estreitamento ao longo de uma secção de 10m. O comprimento total do canal é de 32.57m, com uma zona de geração de onda de 4.2m seguida de um trecho de 11.2m e fundo horizontal coincidente com o estreitamento. Após o trecho de fundo horizontal, o canal apresenta uma rampa com um comprimento de 7.04m e um declive de 1:14 que favorece a rebentação de onda. No final do canal existe uma rampa com 9.53m de comprimento e declive reduzido (1:136) (Fig. 1). O início do referencial em x (eixo longitudinal) e z (eixo vertical) está localizado no início da rampa onde vai ocorrer a rebentação. No topo da rampa de rebentação, a altura da coluna de água em repouso é de 0.1m. Importa referir que a rampa tem início ainda antes do final do estreitamento, sendo que este acaba depois de 0.8m de rampa (em x=0.8m).

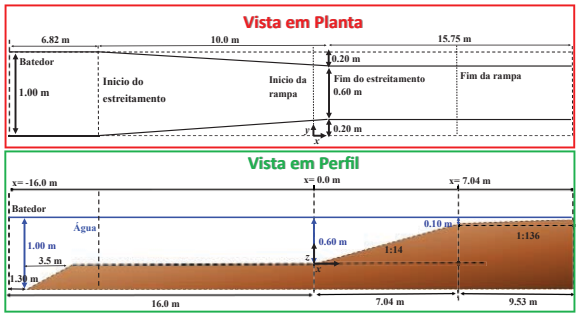


Fig. 1. Vista em Planta e em Perfil do canal de ondas.

Foi gerada uma onda regular com período T de 4.5s e 0.1m de altura (H). Para estas características, e tendo em conta os declives envolvidos, a rebentação induzida na rampa é do tipo mergulhante.

Foram realizadas simulações numéricas 2D (configuração de malha no plano XZ como indicado na Fig. 1) e 3D para verificar as diferenças provocadas pela alteração da configuração em planta. Tal permitiu avaliar a necessidade de considerar uma simulação 3D para melhor representar o campo de velocidades na singularidade. Para as simulações 2D e 3D foram definidas sondas ao longo do estreitamento a fim de obter os valores calculados das elevações da superfície livre e do campo de velocidades a meio da coluna de água, e com um espaçamento de 0.2m ao longo de todo o estreitamento. Para o caso particular da configuração em 3D foram ainda obtidos valores da componente longitudinal do campo de velocidades em perfis transversais com um espaçamento de 0.05m, estando o primeiro perfil transversal localizado no início do estreitamento (x=-9.2m). Seguem-se localizações a 3.0m de início do estreitamento (x=-6.2m), a 3.0m do final do estreitamento (x=-2.2 m) e no final do estreitamento (x = 0.8 m).

3. MODELO NUMÉRICO

No presente estudo utilizou-se um modelo numérico euleriano, multifase e baseado nas equações RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*). Este modelo está disponível através do pacote OpenFOAM® (*OpenField Operation And Manipulation)* (Greenshields, 2015).

3.1. Equações RANS

As equações de *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* para um fluido incompressível incluem a equação de conservação da massa (Eq. 1) e a de conservação de quantidade de movimento (Eq. 2).

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) - \nabla \cdot \left(\mu_{eff} \nabla U\right) = -\nabla p^* - g \cdot X \nabla \rho + \nabla U \cdot \nabla \mu_{eff} + \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (2)$$

onde X é o vector posição, ρ é a massa volúmica, U é o vector da velocidade, p^* é a pressão pseudo-dinâmica (dependente não só da velocidade e da massa volúmica mas também da posição da superfície livre), g é a aceleração da gravidade, σ é a tensão superficial, κ é o parâmetro de curvatura da interface entre as duas fases (ar-água) e α representa a função indicadora da fase.

Este modelo utiliza um método VOF que permite verificar e calcular as propriedades do fluido em cada célula; α = 1 indica que a célula está totalmente ocupada com água e α = 0 que a célula está totalmente ocupada com ar. A posição da interface ar-água está associada a valores intermédios de α.

3.2. Algoritmo numérico

Para resolver as equações RANS no volume de discretização foi utilizado o algoritmo IHFOAM, desenvolvido por Higuera et al. (2014). Com este algoritmo numérico é possível gerar vários tipos de ondas incidentes e também aplicar absorção activa em qualquer fronteira do domínio computacional.

3.3. Implementação do modelo numérico

A geração de onda no modelo numérico foi semelhante à geração de onda no modelo físico para o COI3 nas instalações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, e não foi aplicada qualquer absorção de onda nas fronteiras do domínio computacional.

Para ter no mínimo 10 ondas no domínio, foram simulados 50s de propagação de ondas no modelo. O passo de tempo para o cálculo foi ajustado de forma automática durante a simulação para se obter um número de Courant máximo de 0.5.

A rebentação da onda que ocorre no fim da rampa está fora do trecho de cálculo associado ao estreitamento. Por esta razão, não foi utilizado qualquer modelo de turbulência.

A discretização espacial da malha 2D consistiu em células de 0.015 x 0.015m (total de 86840 células) e a malha 3D, para manter o mesmo espaçamento, apresenta células de 0.015x0.015x0.015m (total de 4342000 células). Ambas as configurações foram simuladas através de computação em paralelo, utilizando 64 processadores. O tempo de cálculo associado ao caso 2D demorou 2h enquanto que o caso 3D demorou 3 dias.

4. RESULTADOS

Os resultados são apresentados em três pontos: o primeiro mostra a variação da altura de onda significativa para os casos 2D e 3D; o segundo exibe a variação da velocidade em *x* (*u*) e o valor médio quadrático da velocidade em *y* (*v*) e o terceiro expõe a variação transversal da componente *x* da velocidade (*u*) em 4 secções do canal ao longo do estreitamento (3D).

4.1. Altura de onda significativa

A Fig. 2 mostra a evolução da altura significativa de onda ao longo da secção de estreitamento do canal. Verifica-se claramente um aumento deste parâmetro no caso 3D em relação ao caso 2D. Do meio do estreitamento até ao final deste existe um aumento médio de altura de onda de 29% com uma variação máxima de 46% no final da secção de estreitamento.

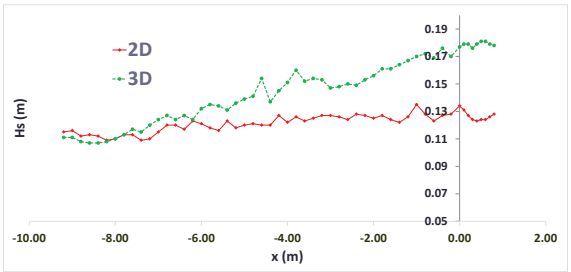


Fig. 2. Altura significativa de onda (Hs) para as simulações 2D e 3D ao longo do estreitamento do canal.

4.2. Velocidades

As próximas três figuras (Fig. 3, Fig. 4 e Fig. 5) apresentam as velocidades médias nas cavas das ondas, a velocidade média ao longo do ciclo de cada onda e a velocidade média nas cristas. Verifica-se que existem algumas diferenças entre as simulações 2D e 3D. Constata-se que o campo das velocidades associado à simulação 3D apresenta uma maior amplitude de valores, ou seja, velocidades nas cavas com maiores valores negativos e nas cristas com valores positivos mais elevados. Este facto reflecte, por um lado, o aumento da altura de onda, patente na Fig. 2, e por outro a assimetria que começa a desenvolver-se na parte final do estreitamento.

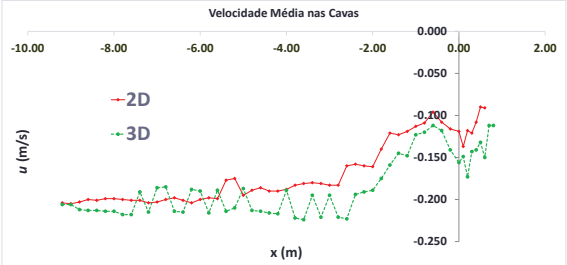


Fig. 3. Velocidade média (u) nas cavas para os casos 2D e 3D ao longo do estreitamento do canal.

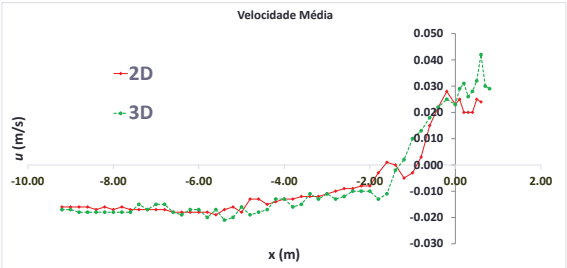


Fig. 4. Velocidade média (u) para os casos 2D e 3D ao longo do estreitamento do canal.

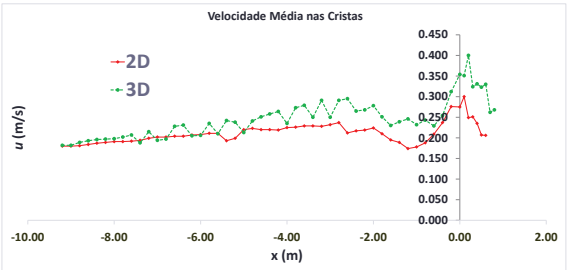


Fig. 5. Velocidade média (u) nas cristas para os casos 2D e 3D ao longo do estreitamento do canal.

A Fig. 6 mostra a evolução do valor médio quadrático da componente transversal do campo de velocidades (*v*) ao longo do estreitamento, considerando a simulação 3D. Esta variação é consideravelmente irregular. Todavia, o aumento, em geral, à medida que se avança no estreitamento indica um efeito tridimensional que não pode ser capturado por uma simulação 2D.

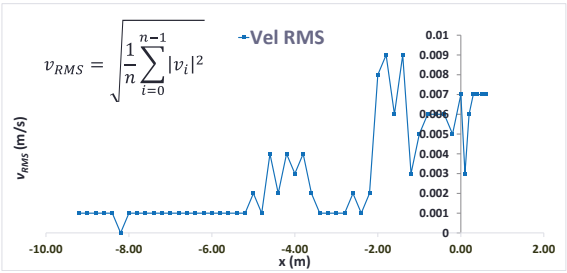


Fig. 6. Valor médio quadrático dos valores da componente transversal (v) das velocidades do canal.

4.3. Perfis transversais da velocidade

Os perfis transversais da média da componente *x* da velocidade (*u*) (Fig. 7) mostram que na secção do início do estreitamento (x=-9.8m) e na secção final (x=0.8m) a diferença de velocidades ao longo da transversal é mínima, contrastando com as secções x=-6.2m e x=-2.2m, em pleno estreitamento do

canal, que mostram uma clara não uniformidade nos valores da velocidade e a influência das paredes.

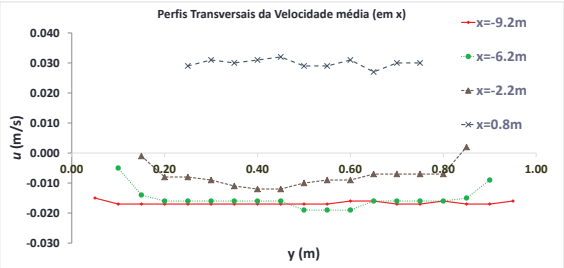


Fig. 7. Variação transversal da componente longitudinal da velocidade (u) em 4 secções ao longo do estreitamento do canal (3D).

5. CONCLUSÕES

O trabalho aqui desenvolvido pôs em evidência a influência do estreitamento lateral de um canal na propagação de ondas e quantificou, para um caso específico, a variação de velocidades e alturas de onda entre um caso sem estreitamento e com estreitamento.

Foram realizadas simulações com o modelo numérico OpenFOAM® baseado nas equações Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) de volumes finitos.

As simulações numéricas mostraram o efeito do estreitamento do canal na propagação das ondas. Em particular, as alturas de onda exibem um aumento geral de 29%, chegando a atingir um máximo de 46%. As velocidades apresentam efeitos na amplitude das velocidades entre as cristas e as cavas e no desenvolvimento de uma componente transversal do campo de velocidades. Os perfis da componente longitudinal do campo de velocidades, na direcção transversal do canal, mostram também a influência das paredes na distribuição de velocidades.

No futuro, pretende-se validar os resultados aqui apresentados com dados experimentais de ensaios a prosseguir no canal COI3 do LNEC, acima descrito. É necessário também aprofundar o estudo aqui desenvolvido alargando o tipo de configurações de estreitamento e alargamento lateral de canais de ondas.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) o financiamento através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/52483/2014.

REFERÊNCIAS

Benilov, E. S., & Yaremchuk, M. I. (1991). On water-wave propagation in a long channel with corrugated boundaries. *Wave Motion*, *13*(2), 115–121.

Chang, P., Melville, W. K., & Miles, J. W. (1979). On the evolution of a solitary wave in a gradually varying channel. *Journal of Fluid Mechanics*, *95*(03), 401-414.

Didier, E., Neves M. G. (2010). Modelação numérica da propagação das ondas ao longo de um perfil barra-fossa com dois modelos RANS. *1as Jornadas de Eng. Hidrográfica*, Lisboa.

Greenshields, C. J. (2015). OpenFOAM userguide version 2.4.0, OpenFOAM Foundation Ltd.

Grimshaw, R., Pelinovsky, E., Talipova, T., & Kurkina, O. (2010). Internal solitary waves: Propagation, deformation and disintegration. *Nonlinear Processes in Geophysics*, *17*(6), 633–649.

Higuera, P., Lara, J. L., and Losada, I. J. (2014). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM®. Part I: Formulation and validation. *Coastal Engineering*, 83, 259–270.

Quaresma, L. (2006). Observação de Ondas Internas Não-Lineares Geradas sobre o Canhão Submarino da Nazaré. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências da Univ. Lisboa.

Teng, M. H., & Wu, T. Y. (1994). Evolution of Long Water-Waves in Variable Channels. *Journal of Fluid Mechanics*, *266*, 303–317.

Yoon, S. B., & Liu, P. L. F. (1987). Resonant reflection of shallow-water waves due to corrugated boundaries. *Journal of Fluid Mechanics*, *180*, 451–469.

A Comparison with Reanalyses Data of Global Coastal Low-Level Wind Jets

D. C.A. Lima (1), P. M.M. Soares (2), A. Semedo (2,3), R. M. Cardoso (2)

(1) Instituto Dom Luiz, University of Lisbon, Lisbon, Portugal. dclima@fc.ul.pt.

(2) Instituto Dom Luiz, University of Lisbon, Lisbon, Portugal.

(3) Escola Naval-CINAV, Almada, Portugal.

Abstract: Coastal Low-Level Jets (CLLJs) are coastal parallel winds features within the first 1000 m above sea level. CLLJs occur in the eastern side of the semi-permanent subtropical mid-latitude high pressure systems. A global climatology of global CLLJs has already been developed based on the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Interim Reanalysis (ERA-Interim). In the present study, a comparison between different reanalysis will be presented. This will enable to assess the performance of the different reanalyses in the CLLJs representation, and to understand its uncertainties. We will use the ERA-Interim Reanalysis, the Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55) and the National Center for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR). The global CLLJs are identified and characterized in each reanalysis and then their spatial distribution and their main properties are compared for the 1979-2008 period.

Key words: Coastal low-level wind jet, reanalyses.

1. INTRODUCTION

Reanalyses are an important resource for research of the atmosphere phenomena's. They are generated using numerical weather prediction (NWP) systems assimilated with different type of observations. This results in a dataset with different meteorological variables in a regular time and space. This is an useful resource, since in some places the observations are rare or doesn´t exists. Reanalyses provide us a description about the recent climate, which contribute to study the synoptic and global scale phenomena, such as the North Atlantic Oscillation and El Niño/Southern Oscillation. The coastal low-level jets (CLLJs) are a coastal parallel wind features within the low troposphere and, for that reason, reanalyses data are important to provide information about their spatial distribution and variability but also about their main properties.

CLLJs have a relatively small vertical extent limited to the marine atmospheric boundary layer (MABL). The maximum of the wind speed occur in the first 1000 m above the sea level (Beardsley et al. 1987, Garreaud and Munõz 2005, Ranjha et al. 2013). Their horizontal extent offshore can exceed distances in the order of hundreds of kilometers.

Generally, CLLJs occur in the eastern side of the semi-permanent subtropical mid-latitude high pressure systems, with one exception in the Arabian Sea. The high-pressure systems over the ocean and the inland thermal lows, which develops due to the intense heating over land, are the main synoptic and mesoscale forcing of CLLJs, resulting in coastal parallel winds. CLLJs occur mainly during the summer season, but the associated synoptic pattern starts in late spring and can last up to early autumn.

The CLLJ regions are found along the cold equator-ward oceans currents of California (California CLLJ), of Portugal – Canary (Iberia Peninsula and North African CLLJs), of Peru-Humboldt (Peru-Chile CLLJ), of Benguela (Benguela CLLJ) and of West Australian (West Australian CLLJ). The Oman CLLJ, which occurs along the southeast Arabian Peninsula coast, in the Arabian Sea, results of the interaction between the Asia summer monsoon and the Somali Jet. This forces a coastal-parallel flow along the southeast coast of Arabian Peninsula (along Yemen and Oman; Ranjha et al. 2015).

In the CLLJ regions, the coastal winds over the ocean generate upwelling currents due to offshore Ekman transport (Haack et al. 2005). This brings deep cold water to the surface, sharpening the temperature and pressure gradient close to the coast, and leading to a local increase of the wind speed and a decrease of the sea surface temperature (SST; Chao 1985). CLLJs are driven by a pressure gradient produced by a sharp contrast between high temperatures over land and lower temperatures over the sea. These coastal high temperature and pressure gradients give rise to strong baroclinic structures at the coast. Due to the persistence and strong low-level baroclinic structure between the cool ocean and the heated continent, the pressure gradient maximum is at the coast (Burk and Thompson 1996).

Ranjha et al. (2013) built and described a global climatology of CLLJ regions based on ERA-Interim reanalysis at 1º resolution. They developed a filtering algorithm to detect CLLJ based on analysis

of the wind speed and temperature vertical profiles. The global pattern of the CLLJ regions found by Ranjha et al. (2013) are in good agreement with the potential areas mentioned by Winant et al (1988).

The aim of this study is to compare the CLLJ spatial distribution and their main properties between three reanalyses. This will allow to characterize the ability of the three reanalysis in the CLLJs representation. The three reanalyses used here are the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Interim Reanalysis (ERA-Interim; Dee et al. 2011), the Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55; Kobayashi et al. 2015) and the National Center for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR; Saha et al. 2010).

2. DATA AND METHODOLOGY

2.1. Reanalyses Data

The three reanalyses used in this study are ERA-Interim, JRA55 and NCEP-CFSR. The ERA-Interim and NCEP-CFSR begin in 1979, whereas JRA55 starts in 1958. These reanalyses have a temporal resolution of 6-hourly.

The ERA-Interim was generated by a two-way coupled atmosphere-wave model system (Dee et al. 2011). This dataset consists of 6-hourly global fields at a T255 (~80 km) horizontal resolution for the atmospheric fields (1º x 1º for the wave fields) with 60 vertical hybrid levels. A four-dimensional variational data assimilation (4DVAR) scheme was used every 6-h. We will use a different horizontal resolution of the one used by Ranjha et al. (2013).

JRA55 uses the Japan Meteorological Agency (JMA) global spectral model integrated at a TL319 (~55 km) horizontal resolution with 60 levels up to 0.1 hPa. This reanalysis uses the 4DVAR scheme with the T106 inner resolution every 6-h.

The NCEP-CFSR uses the NCEP Climate Forecast System Model and was generated by coupling the atmosphere and the ocean model. The model horizontal resolution is T382 (~38km) with 64 hybrid vertical levels, but the model output resolution is 0.5x0.5 with 37 pressure levels. The spectral atmospheric model uses a three-dimensional variational data assimilation (3DVAR) spectral statistical interpolation (SSI).

2.2. CLLJ Filtering Algorithm

This study takes as reference the CLLJ detection method proposed by Ranjha et al. (2013). The algorithm is based on analysis of the vertical profiles of the wind speed and temperature, at each grid point, for each dataset. The CLLJ occurs when the following criteria are met:

- ✓ the height of the jet maximum is within the lowest 1 km in the vertical
- ✓ the wind speed at the jet maximum is at least ~20% higher than the wind speed at the surface
- ✓ the wind speed above the jet maximum decreases to below ~80% of the wind speed at the surface (i.e. a ~20% falloff) before reaching 5 km above its maximum
- ✓ the temperature at the jet maximum is within the MABL temperature inversion
- ✓ the maximum temperature does not occur at the base.

This method will allow to identify the presence and then the frequency of occurrence of CLLJ at each region (Fig. 1). The global CLLJs are identified and characterized in each reanalysis and then their spatial distribution and main properties are compared for the 1979-2008 period.

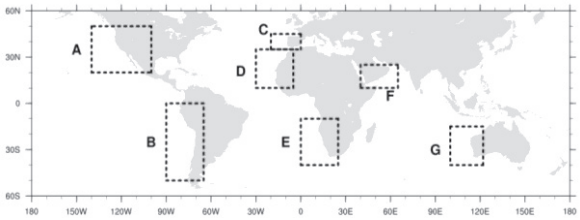


Fig. 1. Global map with regions where coastal low-level jets occur enclosed in black. A – California CLLJ, B – Peru-Chile CLLJ, C – Iberian-Peninsula CLLJ, D – North African CLLJ, E – Benguela CLLJ, F – Oman CLLJ and G – West Australian CLLJ.

3. RESULTS

The coastal jets detection algorithm was applied to the 6-hourly output of ERA-Interim, JRA55 and NCEP-CFSR, and the number of events of the CLLJ occurrences was seasonally aggregated for all seasons. The statistics (frequency of CLLJ occurrence, jet wind speed and jet height) are computed for each CLLJ region represent by the boxes in Figure 1 (the same used by Ranjha et al. 2013), and only for the grid points where CLLJ occur. The mean and maximum frequency of occurrence (Table I), mean jet height and mean jet wind speed (Table II) are computed for the grid points where CLLJ occur, in the respective areas. Figure 2 shows maps of seasonal CLLJ frequency of occurrence for JJA (June, July and August) and DJF (December, January and February) for ERA-Interim (a, d), JRA55 (b, e) and NCEP-CFSR (c, d), for DJF and JJA, respectively. Before comparing the results of the CLLJ in the different reanalyses, the climatology of the CLLJ for the ERA-Interim are presented for both hemispheres.

3.1. Climatology of the Coastal Low-Level Jets

In the northern hemisphere, during boreal summer (Fig. 2a), it is possible to identify CLLJ events in the California region, with a mean frequency of about 7% and a maximum around 48% (Table I); in the west coast of the Iberia, the maximum frequency of occurrence does not exceeds 20% and the mean is around 6%; in the west coast of north Africa (North African CLLJ), the mean frequency is about 11% and the maximum ~60%, and in the Arabian Peninsula (Oman CLLJ), the mean frequency of occurrence is ~14% and the maximum ~72%.

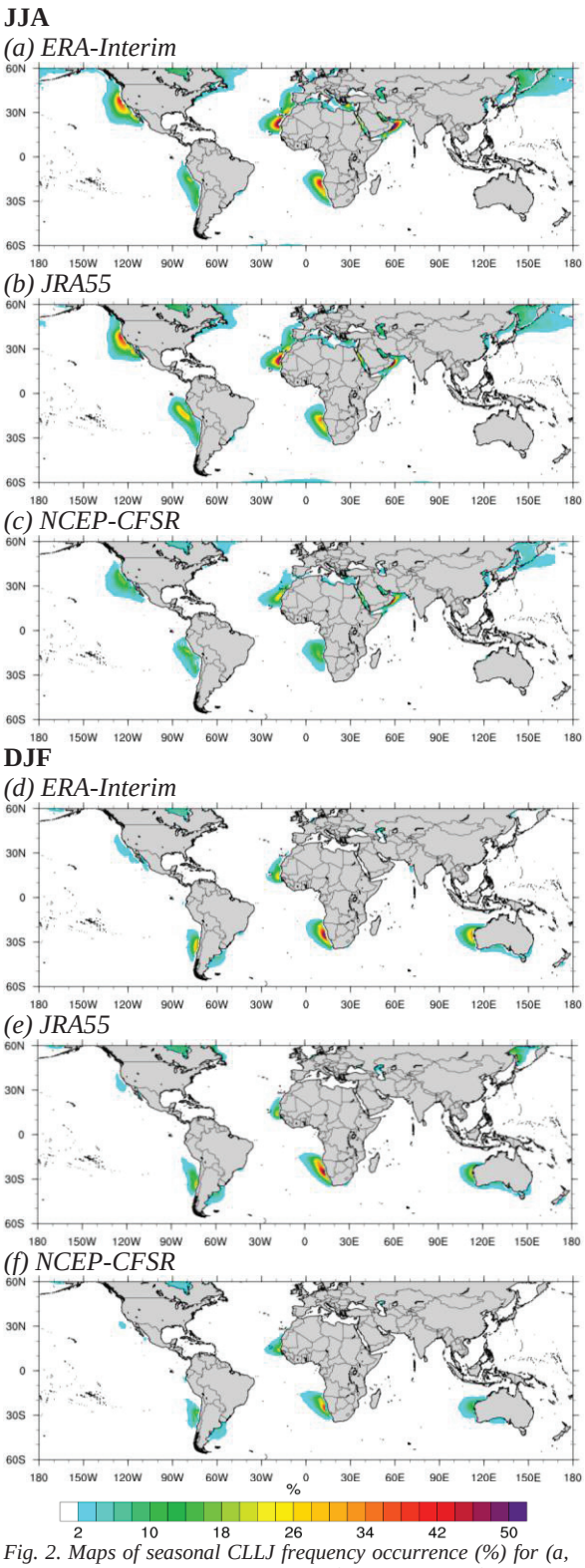


Fig. 2. Maps of seasonal CLLJ frequency occurrence (%) for (a, d) ERA-Interim, (b, e) JRA-55 and (c, f) NCEP-CFSR, for the JJA and DJF seasons.

In the southern hemisphere, in the austral summer, Benguela jet has a maximum frequency around 57% and a mean of ~7%, and in the austral winter, the mean frequency is identical, but has a maximum of about 50%. In JJA, the Benguela CLLJ is located more south than in DJF (Fig. 2a, d). The Peru-Chile CLLJ, in DJF, has a maximum frequency around 35% and a mean of about 2%. In JJA, this jet is detected in two different regions, with similar value of mean frequency but the maximum is around 22%. The West Australian CLLJ are more prevalent in DJF (Fig. 2d), with a mean value of frequency of ~5% and a maximum value around 35%.

3.2. *Differences in spatial distribution and main properties*

The representation of CLLJ in the three reanalyses have a similar spatial pattern, but with differences in the mean and maximum CLLJ frequency of occurrence (Fig. 2; Table I). The results between ERA-Interim and JRA-55 reanalyses are in good agreement, with great similarity among values of frequency of occurrence of CLLJ. In most regions, the ERA-Interim shows slightly higher values of maximum frequency than in JRA55, but in relation to the mean values of CLLJ, the differences are too small. The similarity in results between ERA-Interim and JRA55 is expected as the vertical resolution is identical (60 hybrid levels), although the horizontal resolution has a difference around ~25 km. The NCEP-CFSR represents well the CLLJ pattern, but in most regions, with lower values of frequency of occurrence than in either of the other two reanalyses. The horizontal resolution of NCEP-CFSR has more similar to the JRA55. For the NCEP-CFSR, we use the vertical profiles in pressure levels. This may be the reason why the results in values of frequency are lower.

Table I. Summary of mean and maximum frequency of CLLJ for JJA and DJF season, for coastal low-level jets regions: CCJ (California coastal jet), PCJ (Peru-Chile coastal jet), IPCJ (Iberian Peninsula coastal jet), NACJ (North African coastal jet), BCJ (Benguela coastal jet), OCJ (Oman coastal jet) and WACJ (West Australian coastal jet).

		Mean. Freq. occurrence (%)		Max. Freq. occurrence (%)	
		JJA	DJF	JJA	DJF
CCJ	ERAI	7.26	-	48.43	-
	JRA55	6.48	-	45.72	-
	NCEP	3.05	-	20.50	-
PCJ	ERAI	2.58	2.08	22.92	35.55
	JRA55	4.35	1.83	30.78	33.92
	NCEP	2.26	1.28	38.26	21.81
IPCJ	ERAI	5.57	-	20.67	-
	JRA55	3.74	-	13.81	-
	NCEP	1.64	-	10.13	-
NACJ	ERAI	10.46	3.56	60.42	27.49
	JRA55	9.09	2.03	57.32	25.92
	NCEP	4.50	2.12	30.94	27.47
BCJ	ERAI	6.89	5.94	50.41	56.99
	JRA55	5.81	6.50	41.56	58.48
	NCEP	2.96	3.96	20.40	47.34
OCJ	ERAI	14.13	-	71.73	-
	JRA55	8.34	-	61.20	-
	NCEP	7.41	-	57.93	-
AUCJ	ERAI	-	5.12	-	35.06
	JRA55	-	2.82	-	29.64
	NCEP	-	2.45	-	21.75

The mean of jet height and jet wind speed are also different in the three reanalyses (Table II). In the NCEP-CFSR, the jet occurs in highest levels than the other two reanalyses, in all regions in JJA and

DJF. The mean values of jet height are similar between ERA-Interim and JRA55, with greater differences in the CLLJ regions in the southern hemisphere. The mean jet wind in ERA-Interim is smaller than in JRA55 and NCEP-CFSR. The values of the mean jet wind speed in these two reanalyses are very similar.

The differences in the spatial distribution and in the main properties of the CLLJ may result from differences in the number and type of the vertical levels, but also differences in patterns of some meteorological variables, such as wind speed and temperature.

Table II. The same as in Table I, but for the mean jet height and mean jet wind speed.

		Mean jet height (m)		Mean wind speed (ms^{-1})	
		JJA	DJF	JJA	DJF
CCJ	ERAI	559.79	-	9.86	-
	JRA55	528.25	-	12.68	-
	NCEP	651.53	-	12.40	-
PCJ	ERAI	623.31	530.82	10.65	10.59
	JRA55	696.73	616.30	11.91	12.19
	NCEP	703.27	689.17	11.99	11.86
IPCJ	ERAI	387.35	-	9.31	-
	JRA55	390.76	-	13.08	-
	NCEP	643.51	-	12.79	-
NACJ	ERAI	500.08	395.85	11.48	10.23
	JRA55	511.54	426.15	13.02	12.16
	NCEP	596.98	545.54	13.76	12.18
BCJ	ERAI	482.86	593.99	10.55	11.04
	JRA55	534.08	633.53	12.49	12.95
	NCEP	654.19	695.38	12.40	12.82
OCJ	ERAI	407.78	-	14.45	-
	JRA55	455.50	-	16.73	-
	NCEP	473.64	-	16.24	-
AUCJ	ERAI	-	439.74	-	11.14
	JRA55	-	435.19	-	13.63
	NCEP	-	586.97	-	10.25

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

In this study the ability of the three reanalyses (ERA-Interim, JRA55 and NCEP-CFSR) to represent coastal low-level jets was evaluated. The spatial distribution and the main properties of the CLLJ were presented. The CLLJ statistics were obtained with the CLLJ detection algorithm.

The spatial distribution of the CLLJ, between ERA-Interim and JRA-55 reanalyses, are in good agreement, with great similarity among values of frequency of occurrence. On the other hand the NCEP-CFSR reanalysis present values of frequency of occurrence of CLLJ lower than the two abovementioned reanalyses. The main properties of the CLLJ also have some differences. The mean jet height in the NCEP-CFSR reanalysis is higher than in ERA-Interim and JRA55, which have similar values. The mean jet wind speed is similar between NCEP-CFSR and JRA55, but in ERA-Interim, the values are smaller.

Although there are differences in the CLLJ representation, the results show that there is agreement between these reanalyses.

Acknowledgements

Daniela Lima is supported by FCT through a doctoral grant PD/BD/106008/2014, within the EarthSystems Doctoral Program of the Faculty of Sciences of the University of Lisbon. The work on this study was pursuit in the framework of the SOLAR project, financed by the Portuguese Foundation for Science and Technology. All authors are part of the SOLAR project.

REFERENCES

Beardsley, R.C., C.E. Dorman, C.A. Friehe, L.K. Rosenfield, and C.D. Wynant, 1987: *Local Atmospheric Forcing During the Coastal Ocean Dynamics Experiment 1: A Description of the Marine Boundary Layer and Atmospheric Conditions over a Northern California Upwelling Region*. J Geophys Res, 92:1467-1488.

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., and co-authors. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Q. J. Roy. Meteorol. Soc. 137, 553-597.

Garreaud, R.D. and, R.C. Muñoz, 2005: *The low-level jet off the west coast of subtropical South America: structure and variability*. Mon. Wea. Rev. 133, 2246 – 2261.

Haack, T., S.D. Burk, and R.M. Hodur. 2005: U.S. West Coast surface heat fluxes, wind stress, and wind stress curl from a mesoscale model. *Mon. Weather. Rev.* 133, 3202-3216.

Kobayashi, S., and co-authors, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 93, 5-48.

Ranjha, R., G. Svensson, M. Tjernström, and A. Semedo, 2013: Global distribution and seasonal variability of coastal low-level jets derived from ERA-Interim reanalysis. *Tellus A*, 65.

Ranjha, R., M. Tjernström, A. Semedo, G. Svensson, and R.M Cardoso, 2014: Structure and Variability of the Oman Coastal Low-Level Jet. *Tellus A* 67, 25285.

Saha, S., and co-authors, 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *American Meteorological Society* 91, 1015-1057.

Winant, C.D., C.E. Dorman, C.A. Friehe, and R.C. Beardsley, 1988: The marine layer off northern California: an example of supercritical channel flow. *J. Atmos. Sci.* 45, 3588 – 3605.

The Douro Estuary: Modelling comparison for floods prevention

I. Iglesias (1), S. Venâncio (2,3), R. Peixoto (4), J.L. Pinho (2), P. Avilez-Valente (1,4), J. Vieira (2)

(1) Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental, Universidade do Porto, Rua dos Bragas 289, 4050-123 Porto, Portugal. isabel.iglesias.fdz@gmail.com.

(2) Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal.

(3) Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Av. Guilherme Ferreira, 1940 - Centro, 38022-200, Uberaba, Minas Gerais, Brasil.

(4) Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal.

Abstract: Estuarine areas have been intensively studied due to their complex physical processes and the societal importance of their ecosystem services. To perform a deeper hydrodynamic study allowing an accurate representation of the physical processes, numerical models are essential.
This work performs a comparison of the two 2DH estuarine models, included in the modelling suites OpenTelemac and Delft3D. The aim is to understand how the different numerical schemes might influence the models' output. The models were applied to one of the main Portuguese estuaries: the Douro River estuary. The strong floods that the estuarine region periodically suffers, with economic losses and damages to the local protected landscape areas and hydraulic structures, show the importance of a complete characterization of the areas at risk and how they might be affected. Both models were configured with the same initial and boundary conditions and similar bathymetries. The simulations presented herein use a pre-breakwater construction configuration. However, a post-breakwater construction configuration was also defined and results will be presented at the conference. A special interest will be attached to the role of the Cabedelo sandbar, as this is expected to break for strong river discharges thus diminishing the flooding risk.

Key words: Estuarine modelling, Douro River, hydrodynamics, model comparison, floods.

1. INTRODUCTION

Numerical modelling can be of interest for a broad range of ecosystem services, helping to define the most adequate zones for water catchment, tourism activities, aquiculture, fisheries, and new infrastructures, among others. Models are able to provide a deep understanding of the hydrodynamic processes and erosion/accretion patterns, becoming a tool to assess and predict the effects of hazardous events, and strongly support estuarine and coastal management, promoting the safety of populations.

The studied area is the Douro River estuary and neighbouring coastal areas. It is one of the major rivers of the Iberian Peninsula and flows into the Atlantic Ocean through a highly dynamic mesotidal narrow urban estuary (9.8 km^2 of area; 21.6 km-long) surrounded by two cities: Porto and Vila Nova de Gaia. The freshwater flow rate, controlled by the Crestuma dam and highly depending on the hydroelectric power demand, can reach more than 13000 m^3/s (Azevedo *et al*., 2010), subjected to an inter-annual variability with differences between dry and rainy years. The annual pattern of caudal variability presents a normal behaviour for its latitude: stronger in winter and weaker in summer related with the annual precipitation cycle which is higher between October and May, and lower during July, August and September (Gómez-Gesteira *et al*., 2011).

The strong floods that this estuarine region periodically suffers, with related economic losses and damages to neighbouring structures, increase the importance of its complete characterization. The Cabedelo sand spit and the São Paio Bay, a Nature Reserve, have undergone an evolution due to the breakwater construction, reducing the depth of the natural reserve and increasing the sand spit area (Bastos *et al*., 2012).

Previous studies of the Douro estuary had limited scopes, usually lacking integrated approaches towards a comprehensive morpho-hydrodynamic characterization. Azevedo *et al*. (2008), Magalhães *et al*. (2002) and Mucha *et al*. (2003, 2004) focused on ecological aspects and pollution impacts, and Bastos *et al*. (2012) studied the evolution of the sand spit contour and topography using surveys. In terms of modelling simulations, Azevedo *et al*. (2010) defined river flow scenarios using a 3D hydrodynamic model, but the study is limited to point stations inside the estuary region. Araújo *et al*. (2013) simulated river floods with the ADCIRC model providing a valuable contribution to model development, but defocused from the social risks of floods. Mendes *et al*. (2013) evaluated the potential effect of sea level rise with the MOHID (2D) model

but they implement a low resolution grid. Portela (2008) also used a 2DH model geared towards a sediment dynamics description.

This study intends to analyse the hydrodynamics of the Douro River estuary at a non-flood and flood scenarios, along a comparison between the outcomes of two of the most used high-resolution numerical models: Delft3D and OpenTelemac.

2. DATA AND NUMERICAL MODELS CONFIGURATION

Both Delft3D and OpenTelemac have been extensively used on many estuarine and maritime studies reflecting their suitability to perform this work. A 2DH configuration was selected for both models. The grids (see Figure 1) covers the entire estuarine region from Crestuma to the mouth of the Douro River and also the adjacent coastal area. It was constructed using bathymetric data provided by the Hydrographic Institute of the Portuguese Navy (IH). This data was complete at the open ocean with GEBCO, a global gridded bathymetric data with a 30 arc-second resolution (Becker *et al.*, 2009). The different datasets were interpolated and smoothed to build the final grid. Delft3D uses a regular finite difference grid, while OpenTelemac uses a finite element mesh. Tidal forcing in OpenTelemac was obtained from the TPXO.2 tidal model (Egbert *et al.*, 1994). For Delft3D the main astronomic harmonic constituents were used. The river discharge at Crestuma-Lever dam was provided by Energias de Portugal (EDP). Two different simulations were performed with each model.

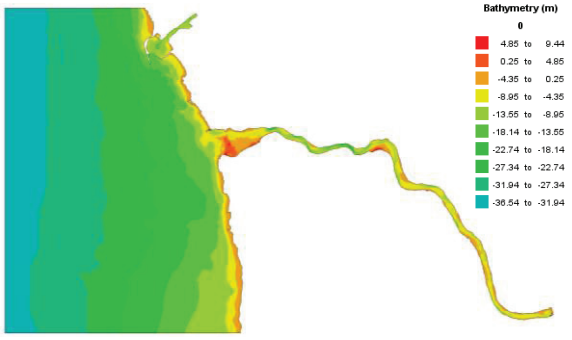


Fig. 1. Models computational domain and bathymetry.

The first simulation is a calibration/validation run performed between 25/Sep/1994 and 04/Oct/1994, with an hourly variation of the river discharge. Data for validation was available from the IH campaigns (Instituto Hidrográfico, 1995). Validation points are identified in Figure 2 and in Table I. The current velocities were measured at three different depths (surface, middle depth and bottom). For comparison with the 2DH simulations, a water column-averaged horizontal current velocity was computed from the campaign data.

The second simulation is a 24 h-long run representing the 09/Jan/1996 historical flood scenario. On this run a constant river discharge of 10500 m^3/s and a constant 1.315 m-high tide free surface elevation were used. The river flow rate was measured by the Centro de Prevenção e Previsão de Cheias (CPPC), downstream from the Crestuma-Lever dam).

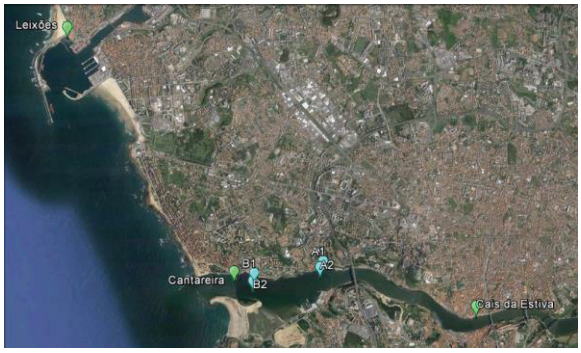


Fig. 2. Location of the validation points. Green for free surface elevation and blue for currents.

Table I. Validation points.

Variable	Name	Latitude (N)	Longitude (W)
Free surface elevation	Leixões	41º 11' 11.814"	8º 42' 16.543"
	Cantareira	41º 8' 44.790"	8º 40' 01.761"
	Cais da Estiva	41º 8' 23.814"	8º 36' 46.522"
Currents	A1	41º 8' 51.011"	8º 38' 49.875"
	A2	41º 8' 47.278"	8º 38' 52.381"
	B1	41º 8' 43.715"	8º 39' 45.539"
	B2	41º 8' 38.958"'	8º 39' 46.465"

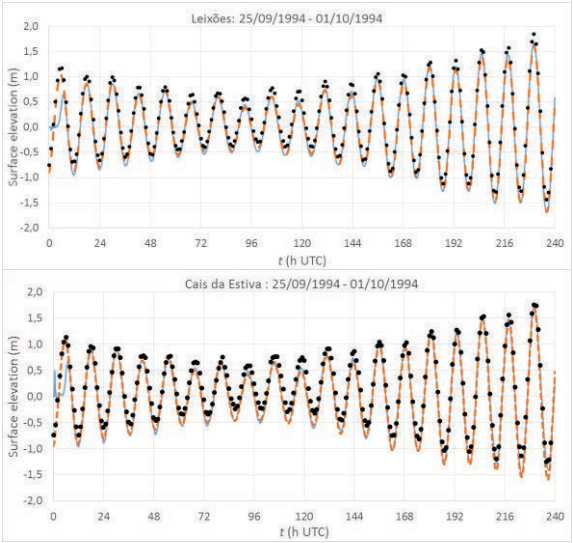


Fig. 3. Validation of the surface elevation (tide). The orange dotted line is for the Delft3D model, and the blue line is for the OpenTelemac model. The black dots represent the tide gauge in situ measurements.

3. RESULTS

3.1. Calibration/Validation simulation

The free surface elevation and the current velocity values were extracted from both models at validation points. Some results are represented in Figures 3 and 4. It can be noticed that the free surface elevations (cf. Figure 3) match relatively well the *in situ* measurements for both models. Nevertheless, both

models underestimate the measured free surface elevation by approximately 0.2 m. This difference is also observed when comparing the TPXO.2 boundary condition with the Leixões *in situ* dataset.

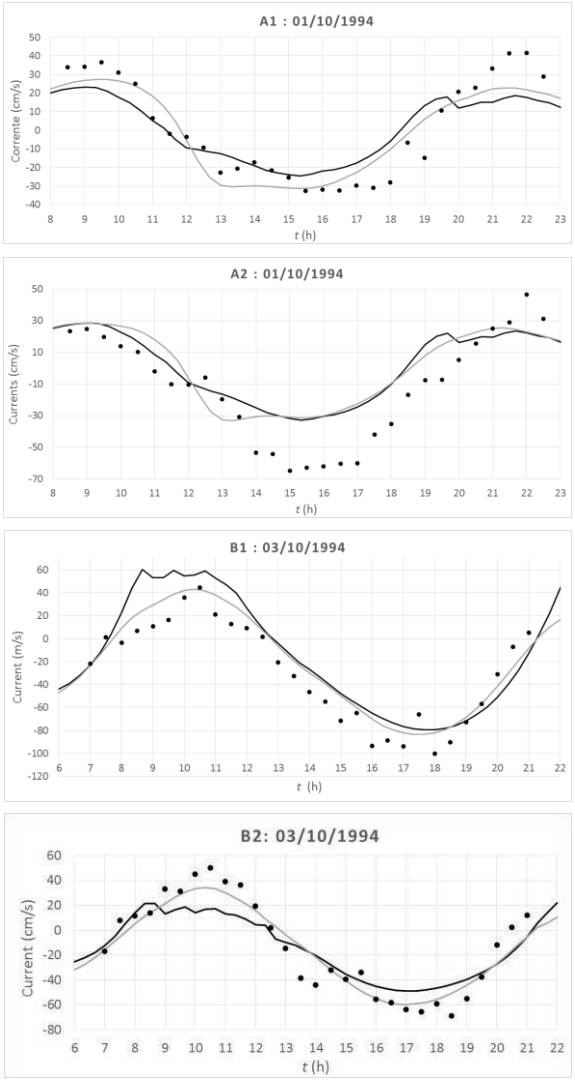


Fig. 4. Currents validation. The grey line is for the Delft3D model, and the black line is for the OpenTelemac model. The dots represent the water column averaged in situ measurements.

As no low pressure systems were located over the region during campaign period, the differences might due to some adjustments on the tide gauge or by some tidal harmonic not considered on the TPXO. The differences are stronger inside the estuarine region (Cais da Estiva) than at the coastal location (Leixões).

The currents (cf. Figure 4) are also relatively well represented, mainly at the A1, B1 and B2 points. The differences observed on the A2 point could be produced in response to the selected Cabeledo sand spit configuration integrated on the models grids.

The sand spit is a highly dynamic structure. It used to change frequently in response to the river flow and there is a lack of available data on its configuration during the 1994 campaigns. Thus the underestimation of the ebb currents for A2 point, might be due to a computational sand spit stronger than the real one.

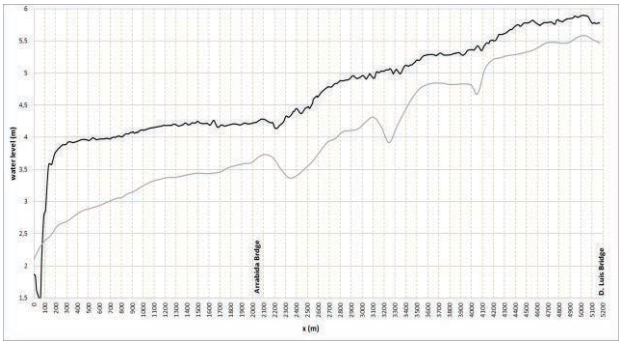


Fig. 5. Free surface elevation for the flood scenario. The grey line is for the Delft3D model, and the black line is for the OpenTelemac model.



Fig. 6. Location of the comparison points for the water level elevation during the 1996 flood.

3.2. Flood scenario simulation

The results obtained for the flood scenario shows a clear difference between the two models, abrupt at the mouth of the estuary region and diminishing upstream. In Figure 5, water lever elevation was plotted along a longitudinal profile traced between the estuary mouth (Cantareira) and the Luís I bridge (cf. Figure 2 and 6). Nevertheless both models show a very high free surface elevation at the Luís I bridge location: 5.5 m for the Delft3D run; 5.75 m for the OpenTelemac run. Historical records for this flood show a measured water elevation of 5.26 m at the Sandeman cellar, and of 5.77 m at Móveis Pina (cf. Figure 6 for locations).

4. CONCLUSIONS

On this work the hydrodynamics of the Douro River estuary were analysed for the 1994 estuarine configuration.

The performed simulations were calibrated and validated using datasets of *in situ* measurements

with satisfactory results. A flood scenario was also run to check the water level and the flood risk of some estuarine regions. Results from two numerical models were used.

This work is the first stage on the creation and selection of a computational suite of models for the evaluation and prediction of the Douro River estuary hydrodynamics and morphodynamics. We expect to be able to provide, in the near future, an accurate representation of the physical processes and to predict the effects of human actions, extreme weather events, and climatic changes on estuarine and coastal regions

Acknowledgements

This research was partially supported by the Research Line ECOSERVICES, integrated in the Structured Program of R&D&I INNOVMAR: Innovation and Sustainability in the Management and Exploitation of Marine Resources (NORTE-01-0145-FEDER-000035), funded by the Northern Regional Operational Programme (NORTE2020) through the European Regional Development Fund (ERDF), and by the CNPq through a scholarship granted to the 2nd author (Process 200016 / 2014-8).

REFERENCES

Araújo, M.A.V.C., Mazzolari, A., and Trigo-Teixeira, A. (2013). An object oriented mesh generator: application to flooding in the Douro estuary. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 65, 642–647.

Azevedo, I.C., Duarte, P.M., and Bordalo, A.A. (2008). Understanding spatial and temporal dynamics of key environmental characteristics in a mesotidal Atlantic estuary (Douro, NW Portugal). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76, 620–633.

Azevedo, I.C., Bordalo, A.A., and Duarte, P.M. (2010). Influence of river discharge patterns on the hydrodynamics and potential contaminant dispersion in the Douro estuary (Portugal). *Water Research*, 44, 3133–3146.

Bastos, L., Bio, A, Pinho, J.L.S., Granja, H., and da Silva, A.J. (2012). Dynamics of the Douro estuary sand spit before and after breakwater construction. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 109, 53–69.

Becker, J.J., Sandwell, D.T., Smith, W.H.F., Braud, J., Binder, B., Depner, J., Fabre, D., Factor, J., Ingalls, S., Kim, S.-H., Ladner, R., Marks, K., Nelson, S., Pharaoh, A., Trimmer, R., Von Rosenberg, J., Wallace, G., and Weatherall, P. (2009). Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30_PLUS, Sediment transport and morphodynamics of the Douro River estuary. *Marine Geodesy*, 355–371.

Egbert G.D., Bennett A.F., and Foreman, M.G.G. (1994). Topex/Poseidon tides estimated using a global inverse model. *Journal Geophysical Research*, 99, 24821–52.

Gómez-Gesteira, M., Gimeno, L., de Castro, M., Lorenzo, M.N., Alvarez, I., Nieto, R., Taboada, J.J., Crespo, A.J.C., Ramos, A.M., Iglesias, I., Gomez-Gesteira, J.L., Santo, F.E., Barriopedro, D., and Trigo, I.F. (2011). The state of climate in NW Iberia. *Climate Research*, 48, 109–144.

Instituto Hidrográfico (1995). *Campanha Hidromorfológica para o Estudo da Barra do Douro, Set/Out 94*. Instituto Hidrográfico. Report REL TF/OF/02/95, Lisboa.

Magalhaes, C.M., Bordalo, A.A., and Wiebe, W.J. (2002). Temporal and spatial patterns of intertidal sediment-water nutrient and oxygen fluxes in the Douro River estuary, Portugal. *Marine Ecology Progress Series*, 233, 55–71.

Mendes, R., Vaz, N., and Dias, J.M. (2013). Potential impacts of the mean sea level rise on the hydrodynamics of the Douro river estuary. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 65, 1951–1956.

Mucha, A.P., Vasconcelos, M.T.S.D., and Bordalo, A.A. (2003). Macrobenthic community in the Douro estuary: relations with trace metals and natural sediment characteristics. *Environmental Pollution*, 121, 169–180.

Mucha, A.P., Vasconcelos, M.T.S.D., and Bordalo, A.A. (2004). Vertical distribution of macrobenthic community and its relationships with trace metals and natural sediment characteristics at the lower Douro estuary. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 59, 663–673.

Portela, L.I. (2008). Sediment transport and morphodynamics of the Douro River estuary. *Geo-Marine Letters*, 28, 77–86.

Subida do Nível Médio do Mar em Cascais, revisão da taxa actual

C. Antunes (1)

(1) IDL – Instituto Dom Luiz, FCUL – Universidade de Lisboa, cmantunes@fc.ul.pt.

Resumo: A monitorização e actualização da estimativa da taxa e aceleração da subida do NMM é de importância crucial, devido ao previsível impacto que estas variáveis terão na ocorrência de eventos extremos de inundação e galgamento e, respectiva erosão costeira. Dada a evolução da subida do NMM devido à dinâmica dos diferentes efeitos resultantes das alterações climáticas, a actualização dos dados de monitorização do nível do mar, quer ao nível local através de marégrafos, quer ao nível global através de dados de satélite, permite a permanente revisão das taxas de subida do NMM, a sua comparação com as curvas de projecção, e consequentemente, a avaliação dos impactos futuros de âmbito regional. A comunicação apresenta uma revisão actualizada da taxa de subida do NMM em Cascais, fazendo uma análise das diferentes componentes e factores que influenciam a sua estimativa e evidenciando uma elevada correlação com a respectiva taxa global.

Palavras-chave: Nível médio do mar, marégrafo de Cascais, subida do NMM, aceleração do NMM, efeito barométrico.

1. INTRODUÇÃO

Ao fim de doze anos e meio de dados adquiridos pelo marégrafo digital de Cascais, da actual Direção Geral do Território (DGT), de forma contínua e com alta taxa de registo, é já possível avaliar a actual evolução da subida do nível médio do mar com um reduzido grau de incerteza. Para além de outras informações e análises que podem ser extraídas e realizadas sobre a série de dados registada, à taxa actual de 3 minutos (de 6 minutos até 2010), a monitorização contínua da variação do nível do mar em Cascais, como referência para a costa portuguesa, é hoje fundamental face ao risco inerente às alterações climáticas, cujo impacto mais evidente e consequente para as populações costeiras é a subida do nível médio do mar (NMM) e a perigosidade associada a inundações e galgamentos costeiros e, recuo da linha de costa.

Devido à dinâmica dos oceanos e sua elevada inércia face à constante e actual mudança climática, a subida do NMM ocorre de forma não-linear, apresentando-se como um fenómeno de tendência acelerado. Como consequência deste tipo de comportamento, verifica-se uma evolução com tendência crescente da taxa de subida do nível médio do mar (sNMM) cuja variação pode chegar no futuro à sua duplicação a cada 10 ou 15 anos.

A falta de continuidade e longevidade de registo de outros marégrafos a nível nacional, como seja, o marégrafo de Lagos da DGT, ou os vários marégrafos do Instituto Hidrográfico (IH), ou a ausência de estudos de análise consistentes dos seus dados, torna o marégrafo de Cascais e as suas séries de dados de elevada importância, quer a nível nacional, quer a nível global, por ser muito utilizada nos estudos e análises da variabilidade do NMM global (pelo menos até 2005).

A complexidade da variabilidade e amplitude das diferentes componentes que constituem a grandeza variável do NMM obriga a um estudo e uma análise detalhada e cuidada da sua série de registo de elevada frequência. Para o fazer de forma rigorosa, é necessário estudar todas as variáveis de origem oceânica e de forçamento meteorológico, bem como, de validação, correcção e referenciação dos dados numéricos da série.

A componente principal que está relacionada com as mudanças climáticas, a chamada componente eustática, embora esteja apenas directamente dependente, em termos conceptuais, do aumento do volume de massa oceânica, que deriva da diminuição de densidade por expansão térmica, e aumento de massa de água por degelo das massas geladas (calotes polares, glaciares continentais e permafroste), é do ponto de vista prático em termos de modelação numérica extremamente difícil de avaliar a partir de uma única série de dados maregráficos. A influência de diversos factores, como o forçamento meteorológico de curto e médio período, os movimentos verticais do marégrafo devido a efeitos tectónicos, efeitos de assentamento estrutural e de reajustamento isostático pós-glacial, bem como, eventuais problemas instrumentais devido a erros ou falhas nos dados, exige uma metodologia completa e criteriosa, cujos resultados nem sempre são possíveis de serem validados. Por vezes, resta apenas esperar que o tempo dê razão e comprovação desses mesmos resultados, ou na melhor das hipótese, comparar com os resultados de métodos globais publicados.

Embora, do ponto de vista de comparação com os resultados de soluções globais, nomeadamente, de

observação por satélite, importa analisar os valores de taxa absoluta de subida do NMM, já para efeitos de avaliação de vulnerabilidade e risco costeiro interessa mais os valores de taxa relativa da subida do NMM ao nível regional, pela relação directa com os impactos costeiros associados.

Neste trabalho são apresentados os resultados da análise da série maregráfica do novo marégrafo digital de Cascais de medição acústica, a operar desde Novembro de 2003. São ainda apresentados e discutidas as correcções e reduções numéricas da série com vista à avaliação da taxa actual de subida do NMM relativa ao datum altimétrico nacional (Cascais 1938).

2. SÉRIE DIÁRIA DO NMM

A série diária do NMM é elaborada a partir dos dados públicos disponibilizados via FTP pela DGT. Estes dados são referidos a uma referência materializada e devidamente cotada por nivelamento geométrico a partir de marcas da rede de nivelamento nacional de alta precisão.

2.1. Correcção da velocidade vertical de sítio

A altitude ortométrica, resultante do nivelamento, da marca de referência que consta nos dados está desactualizada e data ainda de 24 de junho de 2006. Esse valor de referência, obtido com nivelamento, tem-se vindo a alterar ao longo do tempo devido ao assentamento natural do edifício de apoio onde está alojado o equipamento do marégrafo na marina de Cascais. Com base na série de observações de nivelamento geométrico realizadas pelos serviços de Geodesia da DGT é possível determinar as correcções de velocidade vertical relativas que podem ser aplicadas à série de dados do NMM diário observado (Tabela I).

Tabela I. Variação da altitude ortométrica da marca de nivelamento de referência do marégrafo acústico (ΔH – variação anual da altitude; ΔH/Δt – velocidade vertical anual em mm/ano).

Anos	2006	2007	2008	2011	2014	2015
H (m)	3.579	3.577	3.574	3.569	3.565	3.563
ΔH(mm)	-7.9	-1.4	-3.1	-5.5	-4.3	-2.0
ΔH/Δt (mm/ano)	-3.7	-1.9	-2.1	-2.2	-1.4	-1.2

A correcção dos valores diários do NMM devido ao assentamento é realizada por interpolação linear, com base nos valores de velocidades verticais anuais resultantes do nivelamento. A não correcção deste efeito acarretaria em erros significativos na determinação da taxa de subida do NMM, com um aumento na ordem de 2 mm/ano.

A série apresentada na Figura 1 contém os dados do novo marégrafo que foram complementados com valores da série de dados do marégrafo analógico, devidamente ajustados, para o período entre Janeiro de 2000 e Novembro de 2003.

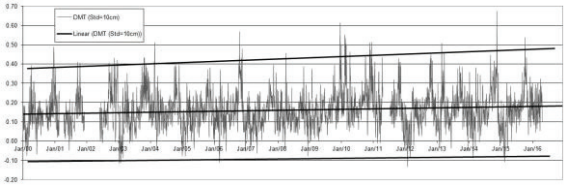


Fig. 1. Série diária do NMM de Cascais (em metros e com DP de 10 cm), entre 2000 e 2015, relativo ao datum Cascais1938.

Os limites máximos e mínimos identificados na Figura 1 com as duas linhas rectas adicionais, servem para identificar a tendência dos extremos da variação diária do NMM. Com essas linhas de tendência identifica-se o aumento dos extremos máximos na variação do NMM que correspondem à ocorrência de temporais, devido ao aumento do forçamento meteorológico, o qual se traduz em sobre-elevações meteorológicas de maior amplitude. Esta tendência evidencia, além disso, um aumento da variabilidade dada pela evolução do desvio padrão dos valores médios diários.

2.2. Correcção do forçamento meteorológico

A série de dados da Figura 1 está isenta de qualquer correcção meteorológica, quer devido ao efeito barométrico inverso (EBI), quer ao efeito do vento de curto e longo período.

Dada a existência do registo *in loco* da pressão atmosférica (PA), para além de valores de temperatura da água e do ar a cada 30 minutos, é possível determinar a correcção do EBI com os próprios dados do marégrafo. Ao fim de vários anos de análise destes dados e da aplicação da correcção do EBI por esta via, constatou-se uma variação anómala nos valores de PA do marégrafo de Cascais, com um aumento na ordem 0.3 hPa/ano. De acordo com Held e Soden (2006) é esperado um aumento da PA nas latitudes baixas e médias e, uma diminuição nas zonas polares, devido às alterações climáticas, contudo não é espectável que haja grandes variações em períodos tão curtos. Devido a este facto foi feita uma investigação aos valores da série de PA de Cascais, comparando-os, nomeadamente, com modelos atmosféricos de reanálise e com valores de uma estação próxima com registos de PA ao nível mar. Feita esta análise concluiu-se que o barómetro digital apresenta uma deriva instrumental, com início em meados de 2009, facto que causa uma sobrestimação da taxa de subida do NMM em cerca de 2 mm/ano. Face a esta situação e antes de ser possível qualquer rectificação ou substituição dos valores de PA da série, assumiu-se o valor de referência da PA, em relação ao qual é calculado o EBI, dado por uma média móvel de 2 anos em vez do valor médio global dos dados do barómetro do marégrafo de Cascais. Desta forma elimina-se o efeito de deriva instrumental verificado, evitando um enviesamento anómalo e não real da estimativa da taxa média de subida do NMM.

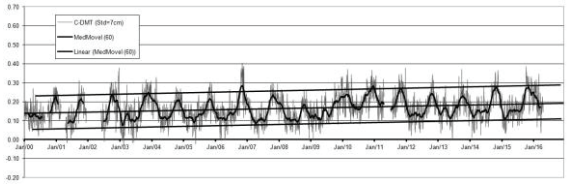


Fig. 2. Série diária do NMM de Cascais (em metros e com DP de 7 cm) corrigida do EBI e respectiva média móvel de 60 dias.

A Figura 2 mostra a série de médias diárias do NMM corrigida da variação da PA. A média móvel de 60 dias sobreposta à série dá-nos a variação anual do NMM isenta das variações de curto período de forçamento do vento. Nesta série é visível o aumento dos valores extremos, máximos e mínimos, com idêntica taxa de crescimento da própria série, facto que não se verificava na série não corrigida. Uma das hipóteses que pode explicar tal diferença é a evolução de intensidade e frequência dos eventos extremos, ao nível da PA e do vento.

3. TAXA ACTUAL DA SUBIDA DO NMM, ANÁLISE E CONCLUSÕES

A variação intra-anual do NMM apresenta um padrão de variabilidade caracterizado pela chamada variação sazonal. Esta variação, apresentando valores máximos no final de cada ano, de Outubro a Dezembro, e valores mínimos de Maio a Julho, deve-se essencialmente ao regime de ventos que assolam a costa oeste atlântica, de verão com ventos do quadrante noroeste, causando o transporte da camada superficial para o largo, o chamado transporte de Ekman que favorece o afloramento costeiro (Fiúza *et al.*, 1982) designado por «*upwelling*» (Wooster e Reid, 1963), e de inverno com ventos do quadrante sudoeste que geram um transporte da camada superficial em direcção à costa causando empilhamento e consequente sobre-elevação persistente. Adicionalmente a este efeito há ainda a considerar o efeito da variação da temperatura da água do mar ao longo do ano e o efeito de variação sazonal da maré, nomeadamente, a componente harmónica anual de maré de influência solar (SA).

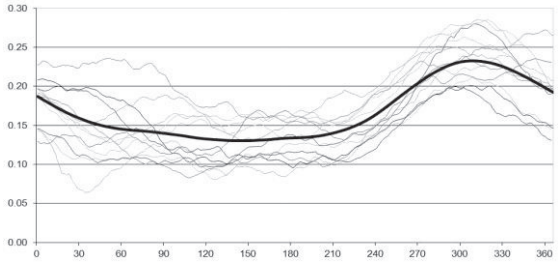


Fig. 3. Variação sazonal (em metros) de 2003 a 2015 e variação média (negrito).

Dada a impossibilidade de uma modelação analítica da combinação destes vários efeitos sazonais, optou-se por uma modelação numérica com base na série decadal dos valores médios diários de maré. A Figura 3 mostra as variações sazonais dos últimos 12 anos, com a qual é possível determinar a variação média sazonal do NMM.

Centrando a curva da variação média sazonal em torno de zero, é possível remover esta variação sazonal média à série diária do NMM corrigida e, assim, obter uma série reduzida cujos vários efeitos até aqui numericamente modelados são removidos, tornando a série próxima daquilo que se pode considerar a variação eustática relativa, a menos de efeitos de variação de correntes oceânicas de longo período e efeitos de compensação ou resposta do equilíbrio hidrostático do oceano.

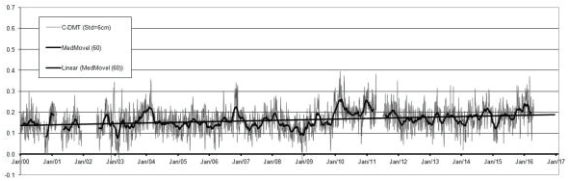


Fig. 4. Série de dados reduzida da variação sazonal (em metros e com 6 cm de DP) e respectiva média móvel de 60 dias com a recta de regressão linear.

Esta série reduzida de variação do NMM apresenta uma variabilidade inter-anual significativamente mais reduzida. Ao aplicar-se a média móvel de 60 dias obtém-se uma curva suavizada com um desvio padrão (DP) de apenas 3.2 cm evidenciando uma maior estabilidade da estimativa da taxa de sNMM ao longo do processo de incrementação e actualização da série com novos dados. A regressão linear da média móvel da série reduzida apresenta assim uma taxa de sNMM mais precisa quando comparada com as séries anteriores, com um DP de apenas 0.09 mm/ano. A taxa média de subida do NMM estimada para o período de 16 anos, de 2000 a 2015, a partir da média móvel de 60 dias da série reduzida é de 3.0 mm/ano (Tabela II).

Tabela II. Variabilidade (DP em cm) das séries de dados, Taxa de subida do NMM (mm/ano) e respectivo desvio padrão para o período de 2000 a 2015.

Séries	DP Série	Taxa sNMM	DP Taxa
Original	9.6	2.5	0.29
Corrigida	6.9	3.4	0.20
MM60_cor	4.9	3.2	0.15
Reduzida	5.7	3.3	0.16
MM60_red	3.2	3.0	0.09

Comparando estes valores com estimativas anteriormente publicadas (Antunes, 2011), os valores aqui apresentados na Tabela II são mais baixos, com uma redução de 0.5 mm/ano na melhor das estimativas. Esta redução deve-se essencialmente a dois factores: 1) a existência de uma anomalia positiva do NMM ocorrida em 2010 devido à intensidade e elevada frequência de temporais nesse ano, associados a um período prolongado do índice da NAO negativo (Antunes, 2014) e consequente estabilização entre 2011 e 2015; e, 2) a correcção efectuada no presente

trabalho ao EBI resultante da deriva instrumental do barómetro do marégrafo com efeito a partir de 2009 que terá enviesado ligeiramente a estimativa obtida em 2011.

Comparando as presentes estimativas da subida do NMM com valores do final do séc. XX deparamo-nos com um aumento significativo da respectiva taxa, evidenciando a existência de uma aceleração na variação do NMM. Recorrendo à série decadal definida entre 2000 e 2015 e aplicando o método denominado de *boostrapping*, em que são estimadas sucessivas taxas de subida do NMM com períodos sucessivamente mais recentes, obtém-se uma série de taxas sucessivamente crescente (colunas 3, 4 e 5 da Tabela III).

Este comportamento de sucessivo aumento da taxa de subida do NMM é característico de um comportamento acelerado, pelo que é possível estimar, para além da taxa para um dado período, também o valor da aceleração da subida do NMM.

Tabela III. Taxas de sNMM para diferentes períodos (em mm/ano), de 1992 a 2004 com a série de dados secular, e de 2000 a Abril de 2016 com dados da série decadal de médias diárias.

Período	1992-2004	2000-16	2003-16	2005-16
Taxa sNMM	2.2	3.0	3.4	4.1
DP Taxa	0.07	0.09	0.11	0.14

Assumindo uma subida do NMM acelerada, com taxa de 2.2 mm/ano de 1992 a 2004 e de 4.1 mm/ano de 2005 a 2016 (dados até Abril), obtém-se uma aceleração de 0.079 mm/ano^2. Este valor mantém a mesma magnitude do valor anteriormente estimado por Antunes (2011), de 0.074 mm/ ano^2, e substancialmente maior do valor estimado por Antunes e Taborda (2009) de 0.024 mm/ano^2. Esta diferença, comparativamente à aceleração estimada em 2009, com dados apenas até 2008, prende-se com a subestimação resultante do reduzido número de dados (de 2000 a 2008), e ainda, o facto de ocorrer uma subida considerável do NMM a partir de 2009, como é visível na Figura 4 e evidenciado pela taxa média correspondente ao período mais recente, entre 2005 e 2016, de 4.1 mm/ano.

Assim, temos uma estimativa da taxa média de sNMM de 3.0 mm/ano para o período 2000-2015, e uma taxa média de 4.1 mm/ano para o período mais recente de 2005-2015. Analisando as várias séries do NMM global resultantes dos dados de satélite, disponíveis e publicadas nas páginas da internet da NASA[1], CSIRO[2] e AVISO (do CNES)[3], podemos obter estimativas semelhantes, de um período mais alargado, entre 1992 a 2016, e de um período mais recente, entre 2007 a 2016 (Tabela IV). Estas estimativas diferem das estimativas para Cascais na ordem de 0.1 a 0.4 mm/ano.

Tabela IV. Taxa de sNMM estimadas com as séries de dados de satélite por diferentes instituições (em mm/ano).

Séries	Taxa 1992-2016	DP	Taxa 2007-2016	DP
NASA	3.42	0.02	4.24	0.07
CSIRO	3.3	0.03	4.30	0.11
AVISO	3.37	0.01	4.14	0.06

Este resultado evidencia uma correlação muito elevada entre a taxa de sNMM de Cascais e a taxa global de sNMM, conclusão já tirada em trabalhos anteriores (Antunes e Taborda, 2009; Antunes, 2011).

Assumindo que estas taxas correspondem a médias estimadas por regressão linear para um determinado período, e que a subida do NMM é acelerada, a taxa actual em 2015 será certamente superior a estas taxas apresentadas. Com base numa simulação e usando a estimativa da aceleração, a taxa efectiva de sNNM em 2015 deverá ser de 4.6 mm/ano.

Agradecimentos

Fundação para a Ciência e Tecnologia, Financed by Project FCT: "Pest-Oe/CTE/LA0019/2013-2014".

À Direcção Geral do Território, pela cedência e facilitação do acesso aos dados do Marégrafo de Cascais.

REFERÊNCIAS

Antunes, C. e Taborda, R. (2009). Sea level at Cascais Tide Gauge: Data, Analysis and Results. *Journal of Coastal Research*, SI 56 (*Proceedings of the 10th International Coastal Symposium*), Lisbon, Portugal, 218-222.

Antunes, C. (2011). Variação actual do NMM em Cascais. *Actas da VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia - CNCG2011*, 366-373.

Antunes, C. (2014). Eventos extremos e a variação do Nível do Mar. *Actas das 3as Jornadas de Engenharia Geográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa 24-26 de Junho, 37-40.

Fiúza, A.F.G., Macedo, M.E., Guerreiro, M.R. (1982). Climatological space and time variation of the Portuguese coastal upwelling. *Oceanologica*, 5, 31-40.

Held, I.M. e Soden, B.J. (2006). Robust Response of the Hydrological Cycle to Global Warming. *Journal of Climate*, 19, DOI:10.1175/2010JCLI4045.1.

Wooster, W.S. e J.L. Reid, Jr. (1963). Eastern Boundary Currents. p. 253-280. In M.N. Hill (ed.), The Sea, Vol. 2. Interscience, New York. 554 p.

[1] http:// http://climate.nasa.gov/vital-signs/ sea-level/

[2] http://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_hist_last_decades.html

[3] http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level.html

Wave Climate Changes in the North Atlantic towards the end of the Twenty-first Century

G. Lemos (1), A. Semedo (4,1), A. Behrens (2), M. Dobrynin (3), P. Miranda (1) and J. Staneva (2)

(1) Instituto Dom Luiz, University of Lisbon, Lisbon, Portugal. gillemos.ms@hotmail.com.

(2) Helmholtz-Zentrum Geesthacht Centre for Materials and Coastal Research, Geesthacht, Germany.

(3) Institute of Oceanography, Center for Earth System Research and Sustainability (CEN), Universität Hamburg, Germany.

(4) Escola Naval – CINAV, Lisbon, Portugal.

Abstract: Ocean surface wind waves are of outmost relevance for practical and scientific reasons, having a direct impact in sediment transport, beach erosion, and human activities. Waves are also a part of the climate system, modulating most of the atmosphere-ocean interface exchanges, being the "ultimate" air-sea interaction process, clearly visible and noticeable. In the present study the impact of a warmer climate in the North Atlantic sub-basin future wave climate is investigated through a 2-member "coherent" ensemble of wave climate projections: single-model, single-forcing, and single-scenario. The two ensemble members were produced with the wave model WAM, forced with wind speed and ice coverage from two CMIP5 EC-Earth projections, following the representative concentration pathway with a high emissions scenario 8.5 (RCP8.5).

Key words: Atlantic, ocean, waves, climate, ensemble

1. INTRODUCTION

Anthropogenic emissions of greenhouse gases have been consensually set as the main factor for the last century's atmospheric and oceanic warming trend. This trend will still be present towards the end of the twenty-first century due to further greenhouse gases emissions (Solomon *et al.*, 2007) and inertia of the climate system. The impact of this warmer climate on the North Atlantic wind waves climate is overseen in this article.

Wind generated waves not only have a direct impact in coastal erosion, but also in sediment transport and beach nourishment, in ship routing and ship design, as well as in coastal and offshore infrastructures (Young, 1999), representing a major hazard for any offshore operation or structure or shipping activity. They are also a part of the climate system, being the "ultimate" air-sea interaction process, clearly visible and noticeable by the human eye, influencing momentum, heat and mass exchanges between the ocean and the atmosphere. A greater understanding of the impact of waves in the climate system is required, and potential future changes in wave conditions must be considered due to their impacts on the coastal zone, and human activities. Despite their relevance, long term analysis of wave climate are limited, relying on *in situ* observational records (approximately 40 years in length), satellite altimeter records (25 years in length) and wave reanalysis (45 years with ERA-40 and 35 years with the more recent ERA-Interim, for example, being these reanalysis European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF – products). Regarding future long term wave climate projections, a few studies based on CMIP3 Global Climate Models (GCM) forcing (e.g. Semedo *et al.*, 2013 and Hemer *et al.*, 2012, both mentioned in the IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change – AR5 – fifth assessment report), and in CMIP5 GCM forcing (e.g. Dobrynin *et al.*, 2015) have been recently published in the scientific literature. These studies followed the main recommendation of the first Coordinated Ocean Wave Climate Projection (COWCLIP) workshop (Hemer *et al.*, 2012), which stressed the need of coherent global ocean wave climate projections, since the impact of global warming on future wave climate had been practically ignored in the IPCC AR4 report.

The present study describes the impact of a warmer climate in the North Atlantic's sub-basin future wave climate, using a 2-member "coherent" ensemble of wave climate projections: single wave model (WAM), single GCM forcing (EC-Earth), and single scenario (RCP8.5).

2. DATA AND METHODS

The two referred ensemble members were produced with the wave model WAM, forced with wind speed and sea ice coverage from EC-Earth projections, following the representative concentration pathway with a high emissions scenario 8.5 (RCP8.5). The wave data consists of a set of 6-hourly global fields with a 1º x 1º grid resolution. Here we use the output

for the North Atlantic sub-basin (0º-75ºN and 100ºW-20ºE). The ensemble present climate (historic) period CR20 (mean of CR20-1 and CR20-4, ensemble members nr. 1 and nr. 4) covers the period from 1971 to 2005, and was evaluated with the ECMWF ERA-Interim reanalysis. The projected changes for the North Atlantic's wave climate were analyzed for the 2071-2100 period (future scenario, FC21 (mean of FC21-1 and FC21-4, also, ensemble members nr. 1 and nr. 4)). Here using a post-evaluated shorter historic period, set for 1971-2000 (present climate, PC20 (mean of PC20-1 and PC20-4)), respecting the length of the 30-year climate average system. The analysis includes values of H_s (significant wave height; m), T_m (mean period; s) and P_w (wave potency; W/m, = $(\rho g^2/32\boldsymbol{\pi})*T_m*H_s^2$, as in Semedo *et al.*, 2011), processed for annual and seasonal means (winter and summer seasons: DJF and JJA). In the high latitudes, natural variations of ice cover extent can seriously affect the quality of mean scenarios, due to a considerable reduction of data points available. This situation was dealt by using one of the proceedings proposed by Tuomi *et al.*, (2011), in which every grid cell with a 30% or more ice concentration in the scrutinized periods was coded as land point, leaving only cells with 70% or more of the total time series to be treated as open water.

3. RESULTS

Fig. 1 shows the annual mean normalized differences between the two ensembles' control runs in separate, hereafter called CR20-1 (top) and CR20-4 (bottom) and ERA-Interim (CR20 minus reanalysis normalized by the reanalysis), for H_s and mean wave period T_m. The coherence between the anomalies, in reference to the reanalysis, of each ensemble is visible, with similar difference patterns in the pairs (A) and (B), and (C) and (D). Higher amplitudes were found in the eastern half of the sub-basin and also in the Caribbean Sea and along the eastern coast of the United States, these mostly due to land mask differences (between the wave climate simulations and the ERA-Interim) and not the wave model itself. In the western half of the basin, the reanalysis values tend to be higher for H_s, particularly in the low latitudes and in the Gulf of Mexico (but less than 15%). Wave energy flux (wave power; P_w) values were also tested (not shown) and similar behavior was found. The general agreement between control run ensemble members H_s and T_m and the reanalysis (better than in Semedo *et al.*, 2013 and in Hemer *et al.*, 2012), shows that the WAM model, forced with the wind speed and ice cover from EC-Earth projections, produces realistic scenarios of the North Atlantic wave climate at the end of the 20th century.

Fig. 2 shows the present day (PC20) H_s annual, winter (December to February – DJF), and summer (June to August – JJA) ensemble means. The ensemble projected H_s wave climate changes for the future wave climate (FC21), shows an uniform decrease of H_s over the North Atlantic Ocean (less than 15%). Although, a significant increase in wave heights can be observed near the Arctic, especially during the local summer, reaching approximately 10% (20 cm (locally), e.g. along the east coast of Greenland), mainly due to the retraction of the sea ice cover extent, creating additional free space to wind-sea interactions and wave growth. Another increase is found for the tropical latitudes in the southeastern side of the basin. During the summer, this behavior extends to the Caribbean sea, Gulf of Mexico and west of Iberian Peninsula (possibly as result of an increase in local wind, as mentioned by Cardoso *et al.*, (2016)).

Wave power, P_w is function of wave periods and heights, to the first and second order, respectively ($P_w = (\rho g^2/32\boldsymbol{\pi})*T_m*H_s^2$). Hence, it's only natural for its projected future patterns to be similar to the H_s ones, as shown in Fig. 3. Yet, absolute values differ a lot from the H_s ones: taking normalized differences in account, a near 15% statistically significant projected decrease south of Iceland is expected to take place during DJF. North of the Iberian Peninsula, during JJA, the projected changes will result in an almost 30% decrease in P_w, assuming slight variations in T_m (projected changes of -5% to 5%, not shown). Indeed, any variation of H_s or T_m will alter P_w values in the same direction.

Fig. 4 shows a meridional cross section comparison between zonal annual, DJF and JJA means of H_s for FC21 and PC20 values. The latitude range is 0º–70ºN. There is, as seen before in Fig. 2, a slight decrease in the annual mean values, being more pronounced in the mid to high latitudes and over DJF. Despite the retraction of the sea ice cover extent clearly visible in Fig. 2 (F), there is no considerable projected change in the high latitudes H_s mean values, nor in the latitude of the climatological maxima (there could be a poleward shift considering the increase in open ocean area).

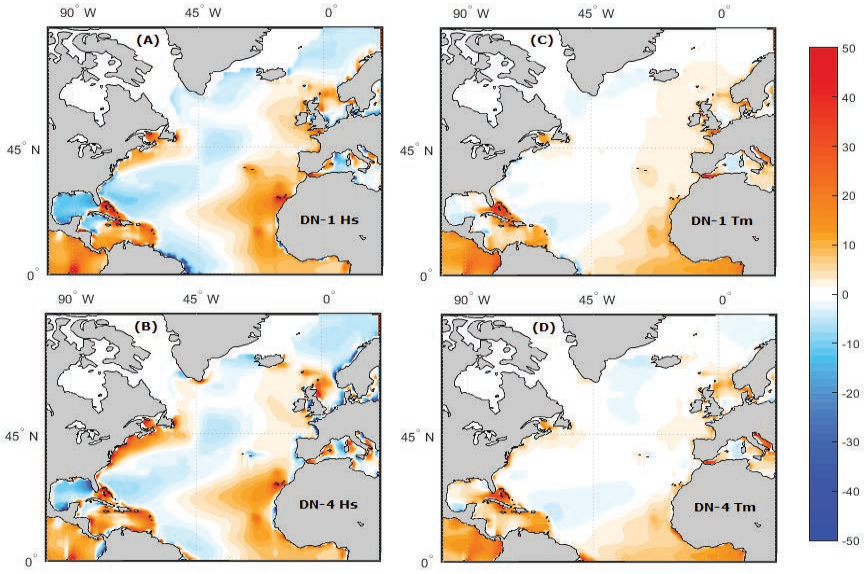


Fig. 1. Normalized differences (in %) between the annual H_s ((A) and (B)) and T_m ((C) and (D)) means of CR20-1 (top) and CR20-4 (bottom), and ERA-Interim: CR20 minus reanalysis normalized by the reanalysis.

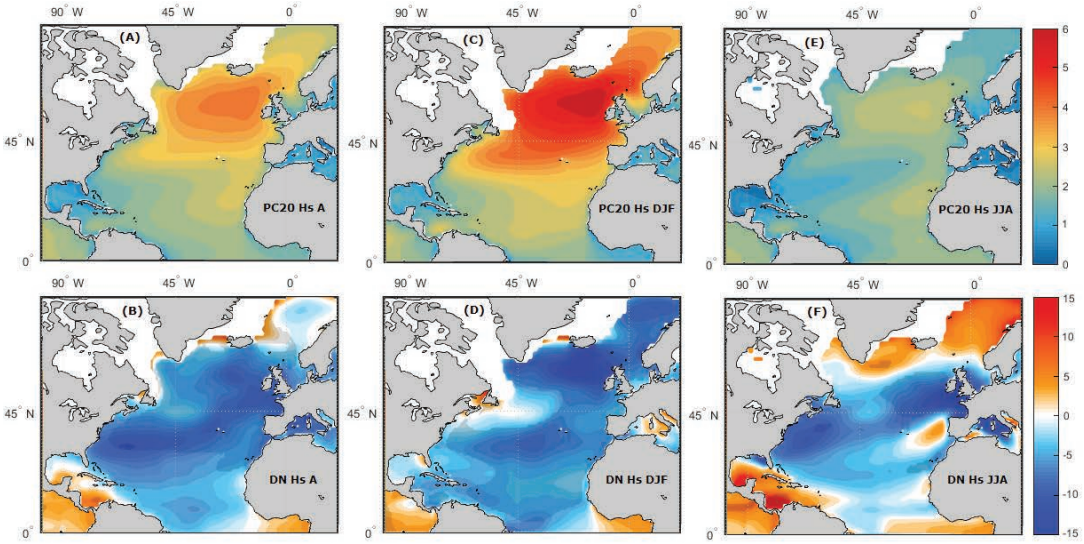


Fig. 2. Annual (A), DJF (C) and JJA (E) PC20 H_s means, and Annual (B), DJF (D) and JJA (F) normalized differences between FC21 and PC20: FC21 minus PC20 normalized by PC20.Regions where the projected changes are statistically significant (at 95% confidence level) are shaded.

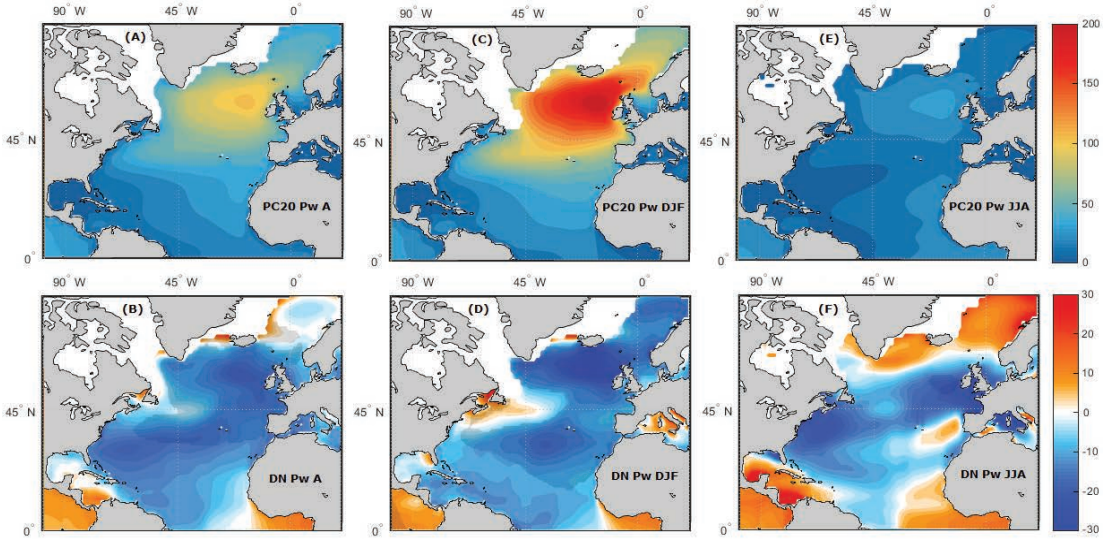


Fig. 3. As in Fig. 2, but for P_w (W/m).

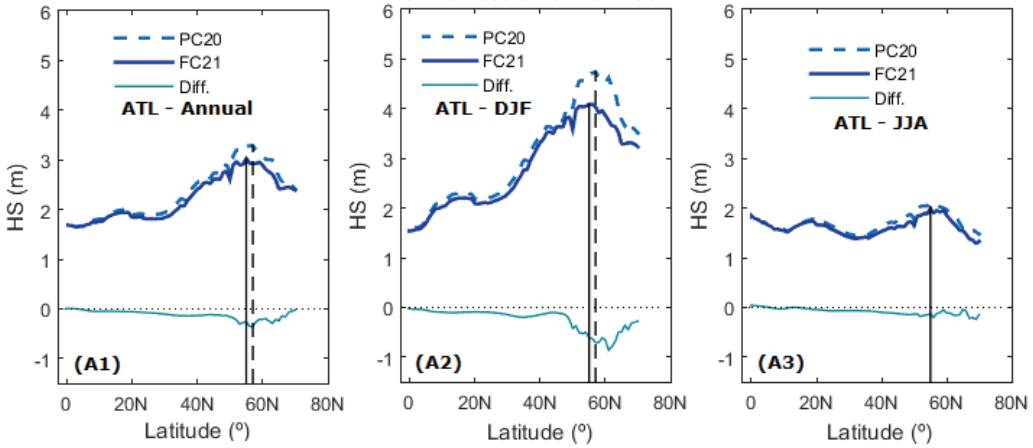


Fig. 4. Meridional cross sections of the zonally total mean annual (A1), DJF (A2) and JJA (A3) Hs for PC20 (dashed line) and FC21 (full line) over the North Atlantic Ocean. The light blue line shows the difference between FC21 and PC20 mean scenarios. The vertical full and dashed black lines represent the latitudes of FC21 and PC20 maximum climatological values.

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

From the analysis of a global simulation composed of a two member "coherent" ensemble, driven by present-day and potential future atmospheric conditions from EC-Earth and RCP8.5 high emissions scenario, the major conclusions are:

- The control run H_s, T_m and P_w fields comparison with ERA-Interim reanalysis provided the required confidence in the wave model WAM to reproduce the global wave climate in the 21st century.
- By the end of the 21st century, due to climate change, H_s and consequently P_w fields are estimated to decrease almost everywhere in the North Atlantic Ocean, excepting in the tropical latitudes and along the east coast of Greenland during JJA (due to sea ice cover retraction). The highest estimated total differences are negative, and located in the northeastern and western flanks of the basin.
- Despite the projected creation of additional ice-free zones near the Arctic, latitudinal shifting of the climatological mean maximum values of H_s was not observed. The most relevant cross section profile changes lay on the peak H_s mean values.

Acknowledgements

This work has been done under the auspices of the JCOMM COWCLIP (Coordinated Ocean Wave Climate projections) project. Alvaro Semedo is funded by the SHARE and SOLAR projects, both financed by the Portuguese Foundation for Science and Technology.

REFERENCES

Cardoso, R. M., Soares, P. M. M., Lima, D. C. A., Semedo, A. (2016). The impact of Climate Change on the Iberian Low-Level Wind Jet: EURO-CORDEX regional climate simulation. *Tellus A*, 68, 29005.

Dobrynin, M., Murawski, J., Baehr, J., Ilyina, T. (2015). Detection and Attribution of Climate Change Signal in Ocean Wind Waves. *Journal of Climate*, 28, 4, 1578-1591.

Hemer, M. A., Wang, X. L., Weisse, R., Swail, V. R., COWCLIP Team. (2012). Advancing wind-waves climate science – The COWCLIP Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, DOI: 10.1175.

Semedo, A., Sušelj, K., Rutgersson, A., Sterl, A. (2011). A Global View on the Wind Sea and Swell Climate and Variability from EERA-40. *Journal of Climate*, 24, 5, 1461-1479.

Semedo, A., Behrens, R., Sterl, A., Bengtsson, L., Günther, H. (2013). Projection of Global Wave Climate Change toward the End of the Twenty-First Century. *Journal of Climate*, 26, 8269-8288.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller Jr, H. L. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. *Cambridge University Press*, 996.

Tuomi, L., Kahma, K., Pettersson, H. (2011). Wave hindcast statistics in the seasonally ice-covered Baltic Sea. *Boreal Environment Research*, 16, 451-472.

Young, I. (1999). Seasonal variability of the global ocean wind and wave climate. *International Journal of Climatology*, 19, 931-950.

Climatology and structure of the summer winds off the Iberian west coast

N. Rijo (1,2), A. Semedo (1,2), P. Miranda (2), D.C.A. Lima (2), P.M.A. Soares (2), Rita M. Cardoso (2)

(1) Escola Naval – CINAV, Base Naval de Lisboa – Alfeite 2810-001 Almada; nadia.sofia.rijo@marinha.pt.

(2) Instituto Dom Luiz - Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Abstract: During summer the regional climate off the west coast of Iberia is dominated by persistent northerly winds often called *Nortada*. This wind regime occurs when the synoptic pattern it is established, due to the effect of the semi-permanent Azores high-pressure system and of a thermal low-pressure system inland Iberia. The climatology of this northerly wind pattern is investigated through the WRF model for the period 1989-2007 at 9 km horizontal resolution produced by downscaling the ECMWF ERA-Interim global reanalysis. Within the *Nortada* winds coastal low-level jets (CLLJ) can occur, mostly in the lee of the main western Iberia headlands (Cape Finisterre, Cape Roca, and Cape Saint Vincent). The link between the *Nortada* and the Iberian coastal low level jet is also studied.

Key words: thermal (pressure) contrast, Nortada, upwelling, CLLJ.

1. INTRODUCTION

The synoptic pattern driving the northerly wind field along the Iberian west coast area is based on the location of the semi-permanent Azores high-pressure system (Davis et al. 1996). During late spring and summer (June to August – JJA), the center of the Azores high shifts pole-ward and, consequently the meridional flow along Iberia becomes predominant. In early fall this high-pressure system starts migrating south, and in turn the westerly to north-westerly winds become more predominant in southwest Europe (García-Bustamante et al., 2010).

If we focus on the regional scale, close to Iberia, the resulting wind field is intensified by the sharpness thermal contrast between ocean and land, particularly in JJA (Rijo et al., 2015). Associated with the equator-ward Canary Current there is a larger scale lower sea surface temperature (SST) off west Iberia (Miranda et al., 2013). The intensive summer radiative heating in-land causes the development of a thermal low-pressure system in central Iberia (Hoinka & Castro, 2003). Therefore, during summer, a thermal (pressure) gradient gives rise to coastal parallel winds named *Nortada*. The name is origin in Portuguese for the northerly direction of the wind (Lopes et al., 2009).

The main objective of this study was to characterize the structure and climatology of the *Nortada* as a seasonal persistent wind pattern off the west coast of Iberia. In our study, we ask under what conditions the *Nortada* occurs and how these conditions can result in a detection criteria algorithm.

The *Nortada* modulates the summer regional climate of Iberia. It induces upwelling, from Galicia to the Algarve, and the cold SST along the coast further increases the thermal (pressure) contrast between the ocean and land at the coast, leading to the local wind speed intensification. Under those conditions, the evaporation over the ocean and the water vapor content in the air decreases, and there is a reduction of marine air advection inland at lower altitudes (Rijo et al., 2016) due to the strong coast parallel winds. For these reasons, the water vapor content of the air over land is lower in summer and some of the mid-latitude western coastal regions (as in California, Peru-Chile, Morocco-Western Sahara, Angola-Namibia, and West Australia) are arid or desert regions (Warner 2004, Nicholson 2010). Nevertheless if the synoptic forcing changes and favors the advection of warm moist air towards the along coast low SST areas (as in early fall in Iberia and California), coastal fog or stratus clouds can occur (Tjernström and Koracin, 1995; Burk and Haak, 1999).

Coastal low-level jets (CLLJ), which occur on the west coast of Iberia, are a particular case of *Nortada* winds. Rijo et al (2016) studied the detailed Climatology of the Iberian Peninsula Coastal Low Level Jet (IPCJ) based on data produced by Soares et al (2012) and the CLLJ detection algorithm proposed by Ranjha et al. (2013). In this study, the link between the *Nortada* and the IPCJ is also studied.

2. DATA AND METHODOLOGY

The regional climate run (hindcast) from Soares et al. (2012), produced with the WRF model covering the period 1989-2007, is used here. The hindcast covers the Iberian Peninsula and a relatively large area of ocean, and was produced by downscaling the ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ERA-Interim global reanalysis. Here we use the results from the innermost domain,

with a 9 km horizontal resolution, to an area defined as "strip" (Fig. 1).

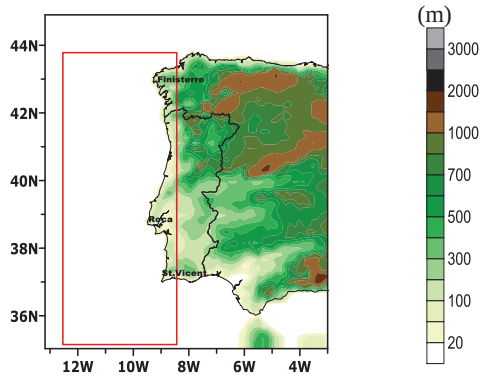


Fig. 1. Area of statistical analysis - strip (red line full) within WRF innermost domain (9km - used in the Soares et al., 2012).

To assess the occurrence of the *Nortada* events in the present study a detection criteria was set, as follows:

- The pressure difference at the surface and the thermal difference between ocean and land (along west Iberia) is greater than 2.5 hPa or 8 K, respectively;
- The pressure at the surface has to be higher over the ocean than in-land (pressure gradient force towards the east);
- The wind direction at the surface has to be from the 335º to 045º sector (north-northwest to northeast)
- The above conditions have to prevail at least for 3 hours (persistency criterion).

These criteria have an empirical basis, namely the 3 hours persistency. The detection algorithm was further applied to the 9 km resolution WRF data.

3. CLIMATOLOGY OF *NORTADA*

The Climatology of the *Nortada* presented here comprises the mean frequency of occurrence and the mean wind speed and direction (when *Nortada* occurs). This statistics were computed for the 1989 – 2007 period, and the results are shown for each grid point into the main area of interest. The analysis is focused on the winter (for December to February – DJF), spring (March to May – MAM), summer (June to August – JJA), and fall (September to November – SON) seasons.

The seasonal frequencies of occurrence of the *Nortada* are shown in Figure 2. The seasonal variability of the *Nortada* occurrences is clear: during JJA, in almost half of the considered period there is *Nortada*. However, there is no uniform spatial distribution of the frequency of occurrence. The frequency of occurrence is, regardless of the season, always greater southwest of west Iberia. The winter (DJF) is the season where occurrence of *Nortada* is lowest (~17 %).

Figure 3 shows the mean wind speed and direction at 10 m above sea level (a.s.l), when *Nortada* occurs (conditional mean). In a similar way it can be seen the seasonality of *Nortada* trough the analyses of the wind field.

Events with higher wind speeds occur mainly during summer, and are from the north. Nevertheless, in this season, the spatial distribution of the wind speed shows more intense mean winds (~9.5 ms^{-1}) northwest of Iberia. Leeward of the main headland an intensification of the wind speed occurs, due to an expansion fan process (Winant et al. 1988).

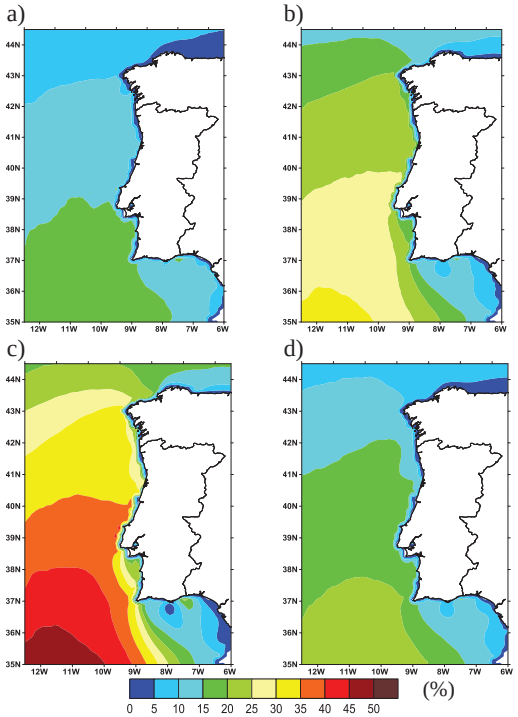


Fig. 2. Seasonal mean of frequency of hourly occurrence (%) of Nortada: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, and (d) SON.

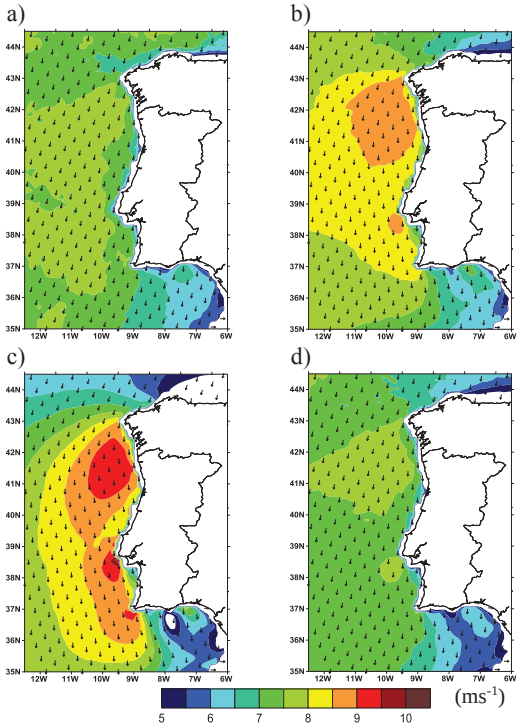


Fig. 3. Seasonal mean of wind speed (ms^{-1}) of Nortada: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, and (d) SON.

4. STRUCTURE OF *NORTADA*

The summer diurnal cycle of *Nortada* is shown in Figure 4. The pressure gradient behind the *Nortada* occurrence reaches the maximum at middle afternoon (16.00; all times in UTC) and the minimum at earlier morning (04.00). Similarly the highest number of *Nortada* events occur around 16.00. However, the lowest rate of wind speed is observed during the early afternoon (~12.00).

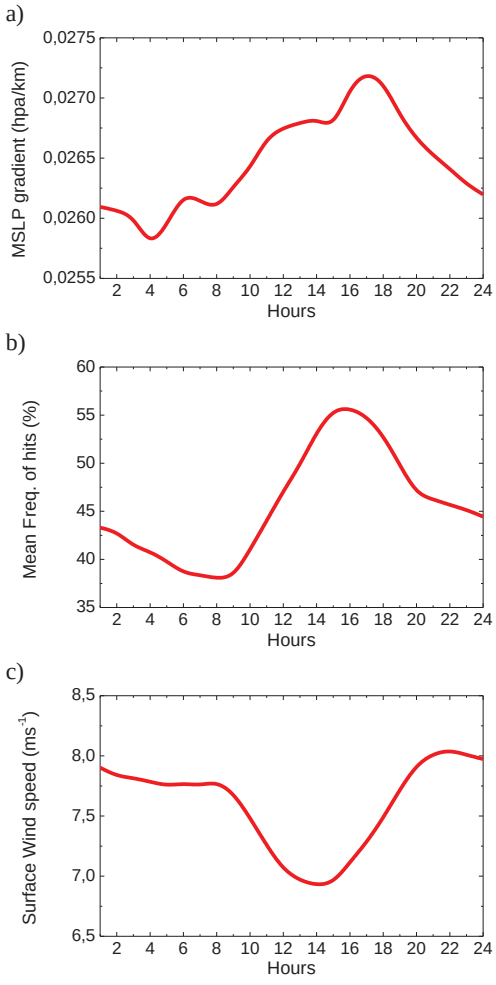


Fig. 4. Summer diurnal cycles (JJA, UTC time) of: (a) MSLP gradient (hPa/km); (b) frequency of occurrence (%) of Nortada; (c) mean surface wind speed (at 10 m a.s.l. model level).

5. SUMMARY OF WESTERN WINDS COAST OF IBERIA CLIMATOLOGY

The link between *Nortada* and IPCJ is shown in this section through the analyses of the intra-annual variability of both phenomena. It was used the strip area to compute all results (see Fig. 1).

The annual cycle of frequency of occurrence of *Nortada* and IPCJ, as well as the monthly mean wind speed, when they occur, is shown in Figure 5. The strong seasonality is once again clear, with summer season comprising the highest number of events of both phenomena. Spring (MAM) is, after summer, the season where IPCJ or *Nortada* events are more frequent along the the west coast of Iberia. In this season it is clearer the increase number of IPCJ until July. After summer, there is a consistency of lower number of events, also more noticeable in IPCJ. In both annual cycles, there are more events of *Nortada* than IPCJ. Although, the link between *Nortada* and IPCJ surface wind speed shows (Fig. 5) that IPCJ when occurs is more intense during extended summer months (May to September – MJJAS). The variability of the *Nortada* wind speed is not much pronounced but it is clear that in summer, particularly in July, is when the more intensive events occur.

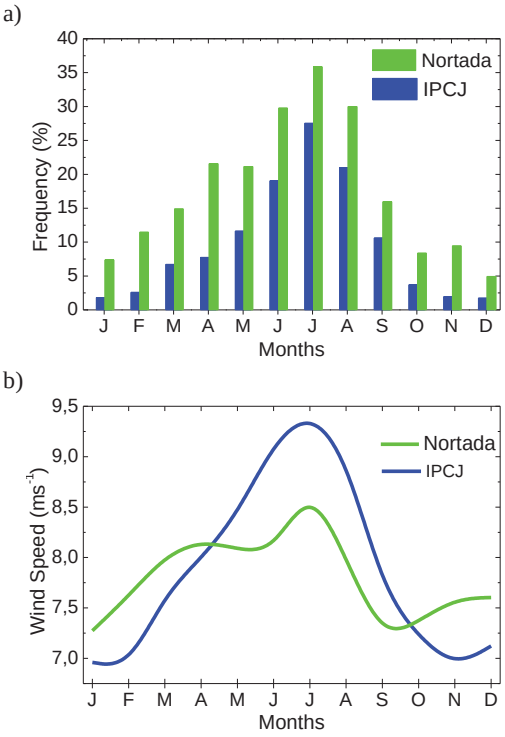


Fig. 5. Monthly mean (Jan to Dec) histograms of: a) frequency of occurrence (%); b) surface mean wind speed (ms^{-1}) of Nortada and IPCJ.

6. DISCUSSION AND CONCLUSION

The criteria proposed for detecting *Nortada* events allowed the characterization of the climatology of this phenomenon. The criteria, proposed in section 2, are based primarily on the assessment of the favorable conditions for the *Nortada* occurrence. Thus, when events are detected in winter, it can be assumed that it occurred under similar conditions as summer events, or under the similar synoptic pattern. The *Nortada* is a persistent seasonal wind along the western coast of the Iberian Peninsula. The *Nortada* frequency of occurrence results showed a strong seasonality, with higher (lower) frequencies of occurrence (wind speeds) in JJA (DJF).

The diurnal cycle of the radiative heating (lower in the morning and higher in the afternoon) induces a *Nortada* occurrence diurnal cycle that has been presented, The MSLP diurnal cycle is noticeable, with well define higher values in afternoon around 18.00 and lowest values around 23.00 to 04.00. The number of hits also shows similar diurnal cycle,

however the decrease of the number of occurrences in the early morning is more notorious with the minimum around 08.00. In spite of this pattern, the diurnal cycle of surface wind speed features the minimum values in the early afternoon (~12.00 to 14.00) and the maximum around 21.00. The delay between the time where there is maximum MSLP gradient and the maximum wind speed resulting from the adjustment of geostrophic flow.

Within the *Nortada* winds, IPCJ can occur, mostly in the lee of the main western Iberia headlands (Cape Finisterre, Cape Roca, and Cape Saint Vincent). The wind speed increases there due to an expansion fan effect generated by gravity waves excited by the interaction of the flow with these capes (Soares et al. 2014, Rijo et al. 2016).

The link between *Nortada* and IPCJ shows a coherent result with similar temporal variability, where most events occur during summer with highest wind speed. In spite of *Nortada* events are always greater than the IPCJ events the mean wind speed of *Nortada*, during late spring and earlier fall are smallest than IPCJ. We assumed as a particular case of *Nortada*, IPCJ occurrence has to be equal or lower than the all *Nortada* events, however the mean wind speed should be greater.

Acknowledgements

This work was pursuit in the framework of the SHARE project (RECI/ GEO-MET/ 0380/ 2012) and of the SOLAR project (PTDC/ GEOMET/ 7078/ 2014), both financed by the Portuguese Foundation for Science and Technology. Rita Cardoso was supported by EUPORIAS — 7th Framework Program for Research, Grant Agreement 308291. All authors are part of UID/ GEO/ 50019/ 2013. The Portuguese Navy and is acknowledged for the financial support to Nadia Rijo.

REFERENCES

Burk S. D., Haack T., Samelson R. M. (1999). Mesoscale simulation of supercritical, subcritical, and transcritical flow along coastal topography. *Journal of the Atmospheric Sciences*,56, 2780-2795.

Davis R., Hayden B., Gay D., Phillips W., Jones G. (1996). The North Atlantic subtropical anticyclone. *Journal of Climate* 10:1788–1806.

García-Bustamante E., González-Rouco J. F., Navarro J., Xoplaki E., Jiménez P. A., Montávez J. P. (2010). North Atlantic atmospheric circulation and surface wind in the Northeast of the Iberian Peninsula: uncertainty and long term downscaled variability. *Climate Dynamics* DOI10.1007/s00382-010-0969-x.

Hoinka K. P. & de Castro M. (2003). The Iberian Peninsula thermal low. (pp. 1491-1511, 129). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* doi: 10.1256/qj.01.189.

Lopes A., Oliveira S., Fragoso M., Andrade J. A., Pedro P. (2009) Wind risk assessment in urban environments: the case of falling trees during windstorm events in Lisbon, In: Bioclimatology and Natural Hazards. *International Scientific Conference, Polana and Detvou, Slovakia*, ISBN 978-80-228-17-60-8.

Miranda P. M. A., Alves J. M. R., Serra N. (2013) Climate change and upwelling: response of Iberian upwelling to atmospheric forcing in a regional climate scenario. *Climate Dynamics*, 40, 2813-2824. doi: 10.1007/s00382-012-1442-9.

Nicholson S. E. (2010) A low-level jet along the Benguela coast, an integral part of the Benguela current ecosystem. *Climatic Change*, April 2010, Volume 99, Issue 3, pp 613-624.

Ranjha R., Svensson G., Tjernström M. and Semedo A., 2013. Global distribution and seasonal variability of coastal low-level jets derived from ERA-Interim reanalysis. *Tellus A.* 65, 20412.

Rijo N. A. Semedo A., Lima D. C. A., Miranda P. M. A., Cardoso R. M., Soares P. M. M. (2015) The Northerly Summer Wind off the West Coast of the Iberian Peninsula. *Proceedings of TransNav 2015* - International Conference on "Marine Navigation and Safety of Sea Transportation", 17-19 June 2015, Gdynia, Poland.

Rijo N., Semedo A., Miranda P. M. A., Lima D. C. A., Cardoso R. M., Soares P. M. M. (2016) Spatial Variability of the Iberian Peninsula Coastal Low-Level Jet Climate. *Summited to Journal of Sciences.*

Soares P. M. M., Cardoso R. M., Miranda P. M. A., Medeiros J., De Belo-Pereira M. and co-authors. 2012. WRF high resolution dynamical downscaling of ERA-Interim for Portugal. *Climate Dynamics*.: 39, 2497-2522.

Soares P .M. M., Cardoso R. M., Semedo A., Chinita M. J., Ranjha R. 2014. Climatology of the Iberia coastal low-level wind jet: weather research forecasting model high-resolution results. *Tellus A.*: 66, 22377.

Tjernström M., Koračin D. (1995) Modeling the impact of marine stratocumulus on boundary layer structure. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52, 863–878.

Warner T. T. (2004) Desert Meteorology. Cambridge University Press, Boston, MA, 595 pp.

Winant C. D., Dorman C. E., Friehe C. A. and Beardsley R. C., 1988. The marine layer off northern California: an example of supercritical channel flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45, 3588-3605.

Fishing areas characterization using satellite, numerical model and HF radar data

L. Lamas(1), P. B. Oliveira(2), J.P. Pinto(1), S. Almeida(1), R. Deus(2), A. Jorge da Silva(1) and N. Almeida(3)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249 - 093 Lisboa, Portugal. email: luisa.lamas@hidrografico.pt.

(2) Instituto Português do Mar e Atmosfera I.P., Rua C do Aeroporto, 1749-077 Lisboa, Portugal.

(3) Deimos Engenharia SA, Av. D. João II, Lote 1.17.01, 10º, Torre Zen, 1998-232 Lisboa, Portugal.

Abstract: The attempt to find associations between oceanographic processes and fish distributions has been a recurring theme in scientific research. In Portugal, the lack of a long time series of complementary data inhibited this type of comparison study. This scenario changed recently with the new operational network of coastal HF Radar, able to provide continuous surface current data, which are critical to the identification of coastal circulation patterns. Combining this data with results of numerical models (HYCOM), satellite data and geo-referenced records of fishing activity data, it is posible to investigate the relations between small pelagic fish catch locations and environmental features. The results are discussed from the identification of the most relevant oceanographic processes (convergence zones, thermal fronts, etc.) and the establishment of associations between these processes and fishing activity data, previously selected and validated according to their reliability.

Keywords: Coastal circulation, fisheries, surface currents, chlorophyll-a, sea surface temperature.

1. INTRODUCTION

SIMOcean (System for Integrated Monitoring of the Ocean) is an Open Data system designed to manage and exploit datasets related to human activities and environmental variables that were originally scattered among different institutes. In order to demonstrate the system's capabilities, three demonstrative cases were designed for specific end-users: (i) fishing areas characterization, (ii) sea state index for harbour areas and (iii) support to search and rescue missions.

The assembling of the different datasets in complementary formats for specific regions, where there is a larger amount of concurrent data, is crucial. For this, the cooperation between the different dataset operators is fundamental. In the present work, several features of the first demonstrative case will be discussed, regarding the combination of different datasets and specific oceanographic features considered relevant for this study.

Finding relations between fish distributions and oceanographic features is not a trivial quest. However, some studies (Solanski *et al.*, 2005; Bakun, 2006; Lanz *et al.*, 2009; Klemas, 2013) support the existence of associations between surface currents, temperature, phytoplankton content and small pelagic fish spatio-temporal distributions.

Until recently, in Portugal, the lack of a long time series of complementary data hindered this type of comparison study. This scenario changed recently when a continuous source of surface currents (HF Radar) complemented with several other datasets (ocean circulation models and satellite retrievals) became available together with geo-referenced fishing activity data from the purse seine fleet. The availability of new datasets with appropriate spatial and temporal resolutions is expected to increase the possibility to find significant correlations between fish catch distributions and oceanographic features.

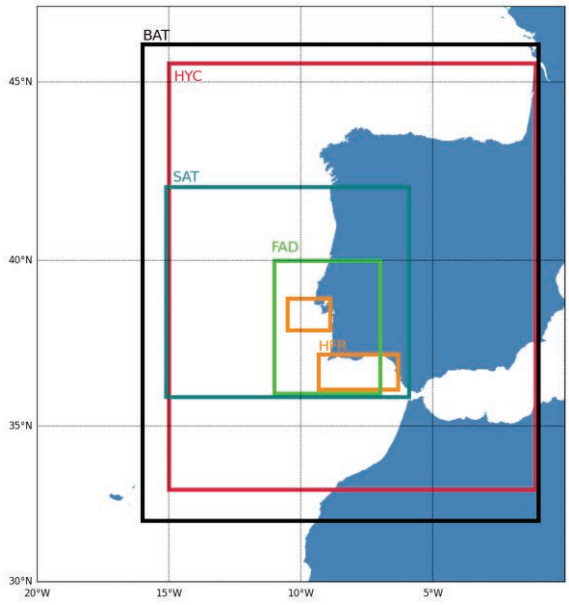


Fig. 1. Study Area with corresponding datasets domains: BAT – Bathymetry, HYC – HYCOM; SAT – Satellite-derived products, FAD – Fishing Activity Data; HFR – HF Radar Systems.

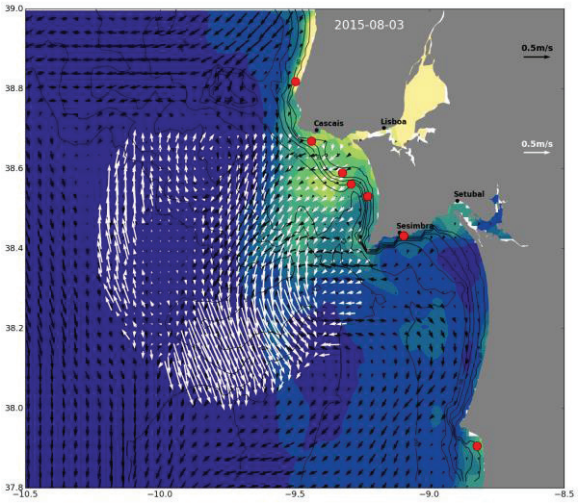


Fig. 2. Daily Snapshot (2015-08-03) of several variables: Surface currents from HYCOM (black quiver); Surface currents from HF Radar (white quiver); Satellite-derived Chlorophyll-a concentration (colour contour); Bathymetry (black contour); and DPE records for that day (red dots).

Physical oceanic parameters, such as surface currents from HF-Radar combined with sea surface temperature (SST) and surface currents from circulation models, can be used to characterize fish catch locations since certain fish species tend to move and follow some specific conditions (Bakun, 2006; Lanz *et al*., 2009). The thermal fronts indicate possible fishing zones and the chlorophyll-a content of the ocean's surface is a good proxy for most pelagic fish. Lanz *et al*., 2009 showed that fish abundance of some pelagic fish over the Pacific was closely related to chlorophyll-a concentration than to SST.

Finally, the inclusion of other less dynamic variables such as bathymetry will also help to characterize the potential fishing areas physical habitat.

2. DATA

A combination of independent datasets covering the Portuguese continental coastal region is used in this study (Figure 1).

The bathymetry is derived from a Digital Terrain Model (charted LW) of the Iberian-Biscay area [32ºN to 46ºN; 16ºW to 1ºW] with 1.8 km resolution, available at www.hidrografico.pt.

We used the 2D outputs (temperature, salinity, currents and elevation at the surface) with a temporal resolution of 1 hour and horizontal resolution of 1', from the numerical model HYCOM. The HYCOM model runs in Instituto Hidrográfico (IH) daily in a full autonomous operational mode, providing a 5-day forecast + 2-day hindcast of the hydrodynamic conditions for the Iberian-Biscay area. The model uses as input results from ECMWF and MERCATOR and the main river inflows for the region.

We used the level-4 daily Optimal-Interpolation satellite-derived product of surface chlorophyll-a concentration data distributed by the Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) at 1 km resolution covering the Iberia-Biscay-Ireland (IBI) Regional Seas.

Sea surface currents are measured hourly by the HF Radar network from IH and interpolated to a regular grid of 1.5 km resolution.

Fishing activity data from the purse seine fleet (>12m) were provided by Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos (DGRM) and consist of two independent datasets.

Data from the Vessel Monitoring System (VMS) that provide automatically acquired vessel position only. And data from the electronic fishing logbooks (Diários de Pesca Electrónicos – DPE) containing estimated catch per species for every fishing operation. The position and date-time group associated with each DPE log may be introduced manually. Both datasets are from the years 2014 and 2015 distributed along the area marked in green in Figure 1.

3. METHODS

3.1. Validating Fishing Data

DPE logs were validated using VMS data. VMS records and DPE logs show, on average, that a vessel performs one voyage per day with associated catch (no fishing operation is registered with null catch). However, some discrepancies were found between the VMS and DPE datasets. Some DPE logs were not in agreement with the position provided by the VMS. Some vessels consistently recorded the catch activity in the harbour or away from the VMS positions and, for other vessels, the VMS record indicates a high number of voyages but only very few DPE logs. For these reasons, a quality control of the fishing activity data was necessary and inconsistent DPE logs were removed. The validation was done according to a combination of criteria: i) all fishing operations outside the area of interest were discarded; ii) Data from vessels that showed less than 30% of DPE logs per total number of voyages were rejected. iii) Rejection of reported fishing operation which position was not consistent with VMS records.

Overall, 27 % of data were removed with this quality control process and 19 out of 49 vessels were excluded totally, since they did not show coherent fishing activity records.

3.2. Combining different Datasets

The visualization of different datasets, in an integrated environment, is a valuable tool to access information about different oceanographic parameters with possible interest to fishing activities. By aggregating different oceanographic

parameters with fishing vessel activity it is possible to relate the fishing locations of certain species to the environmental conditions of that region (Figure 2).

For each DPE log, the values of chlorophyll-a concentration, SST and bathymetry were retrieved using the nearest neighbour square difference method. The result is an integrated database where each individual estimated catch record is associated with those parameters.

3.3 Species and Study Area

The study will focus on the European Sardine (*Sardina pilchardus*) catch due to its economic impact for the Portuguese economy.

According to the DPE logs, the sardine was the second most fished species, with higher frequency of catch during summer (May to August). In this manuscript we will describe some results for the western part of our domain (Area of Interest (AOI): 37-39ºN; 10-8.6ºW), but a study was also conducted for the Portuguese south coast.

This study intends to be exploratory and does not take into consideration any prior knowledge of sardine environmental preferences or available stock size. We only account for the time, location and estimated amounts of sardine catch, and what were the chlorophyll-a and SST conditions at that time, for that location.

3.4. Statistical Approach

A frequency distribution analysis for sardine capture against bathymetry, SST and chlorophyll-a concentration was computed. The distribution was achieved by integrating the data over 2 years (2014 and 2015) for the summer period (May-August) over the west coast

We also calculated the frequency distribution of each variable (bathymetry, SST and chlorophyll-a), averaged for the same period over the AOI. This provides a comprehensive analysis of how each variable is distributed in the region, independently of where the capture occurs.

4. RESULTS

4.1. Fishing Areas Characterization

Figure 3 shows the bar plots for the sardine catch distribution against different oceanographic parameters. SST (Fig. 3 right) and bathymetry (Fig. 3 left) have an approximately normal distribution with maximum values for 18-19ºC and 40-50m, respectively. The chlorophyll-a (Fig. 3 middle), however, shows a right-skewed distribution with the majority of capture occurring for values lower or equal than 1 mg.m^{-3}. A black line corresponding to the frequency distribution of each variable was added to the bar plots. Differences between both distributions may indicate that the sardine capture occurs within specific SST and chlorophyll-a conditions different from the typical conditions of the AOI. Both SST distributions have an approximately normal distribution with the peak at 18-19ºC. The chlorophyll-a distributions, however, show some differences. In spite of both having a right-skewed distribution, the AOI distribution's peak is slightly shifted to higher values of chlorophyll-a concentration. The sardine capture distribution show a percentage plateau of approximately 14% for the bins between 1 and 2.5 mg.m^{-3} that is not present in the AOI distribution.

4.2. Potential Fishing Areas

To study the spatial and temporal variability of the past sardine catch locations dependency on bathymetry, chlorophyll-a concentration and SST conditions, we computed daily maps for a period between 01 and 16 of July 2015 (this period was empirically selected to show the variability of the results). To produce such maps, we linearly interpolated all datasets to a common grid. Then, we selected an index to mark the regions where the conditions corresponded to higher percentages of sardine capture. Those indexes were assigned according to the distributions in Figure 3. The index was computed using: index = min(i_1,i_2,i_3); where i_1 is the index for the bathymetry, i_2 is the index for the sea surface temperature, and i_3 for the chlorophyll-a concentration. Each index was equal to one if the pixel value was equivalent to the classes with 10% or higher; two for 20% or higher, and zero for lower than 10%. Indexes and corresponding classes are presented in Table I. Results are shown in Figure 4. There are only a few regions that fulfil both 10% and 20% criteria and they vary in space and time. Analysis of this variability and its correlation with different dynamical features (thermal fronts, convergence zones, etc.) will be investigated in the near future.

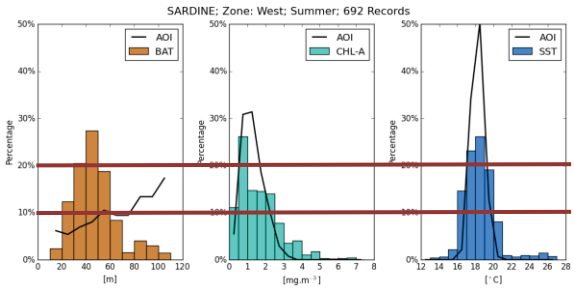


Fig. 3. Bar plots - Distribution of sardine capture per each bin of bathymetry (left), chlorophyll-a concentration (middle), and sea surface temperature (right). Black lines - frequency distribution of each variable averaged for the same period over the domain (AOI). Dark Red lines show the percentage limits chosen to generate Figure 4.

Table I. Variable intervals for each index shown in Figure 4.

Index	Bat[m]	SST[ºC]	CHL[mg.m^{-3}]
1	20 – 60	16 - 20	0 – 2.5
2	30 – 50	17 - 19	0.5 – 1.0

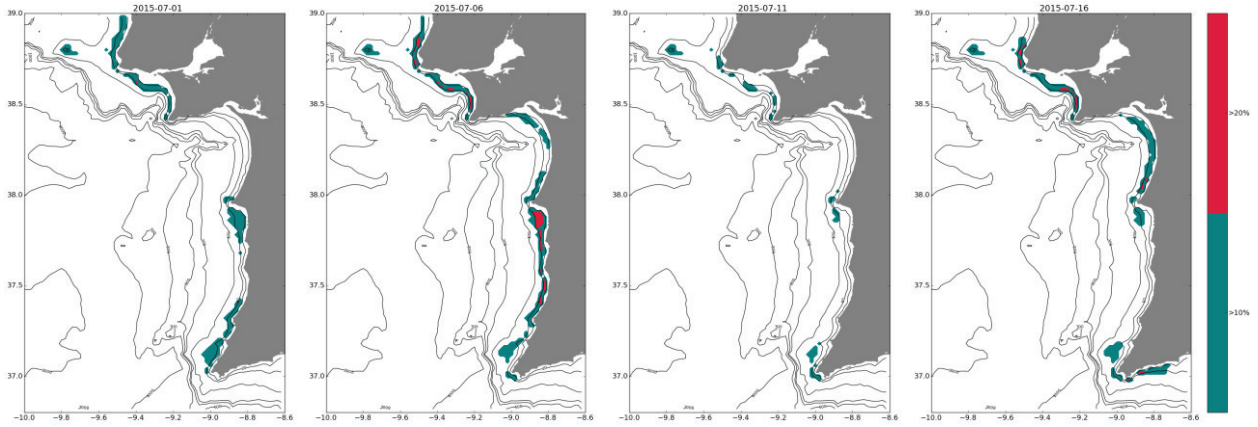


Fig. 4. Maps showing in colour the regions where the daily conditions for 01, 06, 11 and 16 of July 2015 correspond to the classes with more than 10% (teal) or 20% (red) of sardine captures, based on the results of the distributions in Figure 3.

5. SUMMARY AND DISCUSSION

The combination of independent oceanic and meteorological datasets is a powerful tool towards understanding the environmental characteristics of fishing areas.

If a strong correlation between sardine catch locations and oceanographic data is found, a real-time and prediction algorithm describing likely regions of sardine catch might be attempted. This product can be valuable to the fish industry community, since it will bring an optimization of resources and investments from companies, helping a better management of operations and marine resources. To achieve that, the past knowledge of the environmental conditions of fishing areas is fundamental.

In this study, we explored the connection between sardine catch locations with SST, bathymetry and chlorophyll-a concentration. At this stage we were able to compute the SST, bathymetry and chlorophyll-a concentration intervals that represent the typical environmental conditions of preferred sardine catch over the west coast during summer. The distributions in Figure 3 suggest that the sardine capture locations over the west coast, during summer, are more influenced by chlorophyll-a than SST. However, further research on this subject is required for a more comprehensive analysis.

As suggested by Bakun *et al*., 2006, dynamical features like velocity divergence fields, thermal gradient or residence time will likely be important in the oceanographic description of fishing areas and will also be analysed in the near future.

Acknowledgements

Thanks are due to Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos for making available the VMS and DPE datasets, as well as for the enlightening discussions. This is a contribution to Project SIMOcean (System for Integrated Monitoring of the Ocean), Project PT02_Aviso5_0001, partly supported by the financial mechanism of the European Economic Area (EEA Grants)

REFERENCES

Bakun, A. (2006) Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: Opportunity, adaptive response and competitive advantage. *Scientia Marina*, 70(SUPPL. 2), 105-122.

Klemas, V. (2013) Fisheries applications of remote sensing: an overview. *Fisheries Research*, 148, 124–136.

Lanz, E., López-Martínez, J., Nevárez-Martínez, M. and Dworak, J. A. (2009) Small pelagic fish catches in the Gulf of California associated with sea surface temperature and chlorophyll. *CalCOFI Report*, 50, 134–146.

Solanki, H. U., Mankodi, P. C., Nayak, S. R. and Somvanshi, V. S. (2005) Evaluation of remote-sensing-based potential fishing zones (PFZs) forecast methodology. *Continental Shelf Research*, 25 (18), 2163-2173.

Salinity evolution in the Tagus estuary relative to climate change

M. Rodrigues (1), A. B. Fortunato (1) and P. Freire (1)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, mfrodrigues@lnec.pt

Abstract: Climate change represents a potential threat for estuaries, via potential landward intrusion of saltwater, inundation of low-lying areas, acceleration in the nutrients cycling and disruption of aquatic ecosystems. The Tagus estuary, one of the largest estuaries in Europe, holds a major natural reserve and supports diverse activities, some of which may be negatively affected by the landward intrusion of saltwater (e.g. agriculture). In this study, a new three-dimensional hydrodynamics baroclinic model is implemented and validated in the Tagus estuary. A preliminary analysis of the salinity distribution relative to different river flows and sea level rise is also performed. Results show that the model adequately represents the main patterns observed, with significant improvements from previous applications. The classification of the estuary, based on the Venice system, shows contrasting situations regarding the salinity distribution for extreme river flows, and the progression further upstream of the saltwater due to mean sea level rise.

Key words: Numerical modelling, salinity, sea level rise, river flow, Venice system.

1. INTRODUCTION

Estuaries are among the most productive ecosystems on Earth and provide multiple services (e.g. Barbier *et al.*, 2011). They harbour ecologically important habitats for fish, shellfish and birds, protect the coastal ocean from increased contaminant loads and support diverse human activities (e.g. marine transportation, fishing and tourism), providing economic resilience to coastal communities and protecting them from natural hazards.

Climate change represents a potential threat for estuaries and may increase the hazards in these systems (Statham, 2012). Although the full extent of climate change remains uncertain (IPCC, 2013), sea level rise and changes in the hydrological regimes, in particular, can represent major threats to world's estuaries, by increasing the landward intrusion of saltwater, the inundation of low-lying coastal areas, the acceleration in the nutrients cycling and the disruption of aquatic ecosystems, among others (e.g., Statham, 2012). Evaluating the impacts of climate change is thus fundamental when developing management strategies for estuaries and its surrounding activities, to support the adoption of adequate adaptation measures.

The Tagus estuary (West of Portugal), one of the largest estuaries in Europe, may face some of the hazards of climate change. The estuarine margins are intensively occupied and support diverse activities, some of which may be negatively affected by the landward intrusion of saltwater (agriculture, shellfish harvesting, and sewage networks). The estuary itself holds a major natural reserve in the upstream area, which ecosystem dynamics may also be affected by changes in the salinity.

This study aims thus at analysing the salinity evolution in the Tagus estuary, relative to the climatic variability and to climate change. The study is being developed in the scope of the project BINGO (Bringing innovation to ongoing water management - a better future under climate change), which aims at providing practical knowledge and tools to end users, water managers and decision-makers to better cope with changes in climate, including extreme events such as droughts and floods. As a first contribution to these objectives, a new three-dimensional baroclinic model is implemented and validated in the Tagus estuary, and a preliminary analysis of the salinity distribution relative to different river flows and sea level rise scenarios is performed.

2. STUDY AREA

The study area covers the Tagus estuary and, in particular, its upstream area near the Lezíria de Vila Franca de Xira, where an important agricultural area is located. The Tagus Estuary Natural Reserve and some important shellfish areas are also located in the upstream part of the estuary. The Tagus estuary has an area of about 320 km^2 and a complex morphology, with a deep and narrow inlet channel and a broad and shallow inner basin. The intertidal area represents about 43% of the total estuarine surface (Nogueira Mendes *et al.*, 2012). The tides are semi-diurnal, with tidal ranges varying between 0.6 m and 3.8 m in Cascais (Guerreiro *et al.*, 2015). The main source of freshwater into the estuary is the Tagus river, with an average flow of 370 m^3/s (Neves, 2010), followed by the Sorraia river.

3. NUMERICAL MODEL

3.1. Model setup

The three-dimensional baroclinic circulation in the Tagus estuary is simulated with the system of numerical models SCHISM (Zhang *et al.*, in review). This application is based on the previous

applications by Costa *et al.* (2012) and Rodrigues *et al.* (2013, 2016) of the hydrodynamics model SELFE (Zhang and Baptista, 2008) in this estuary.

The domain is discretized with a horizontal grid of about 270 000 elements (Fig. 1) and a resolution that varies from about 2 km near the oceanic boundary to 30 m in some marginal areas. A smaller horizontal grid (of about 166 000 elements) that excludes the low-lying areas (Mouchões and Lezíria) is used in the simulations where no inundation of these areas is expected. The vertical domain is discretized in a hybrid grid with 39 SZ levels (30 S levels and 9 Z levels) based on preliminary data-model comparisons. Three open boundaries are considered: the Atlantic Ocean, and the Tagus and Sorraia rivers. The oceanic boundary is forced with 23 tidal constituents from the regional model of Fortunato *et al.* (2016). The river flows were established based on the data available at SNIRH (http://snirh.pt). The atmospheric forcing was implemented using the NCEP Reanalysis data (http://www.esrl.noaa.gov/).

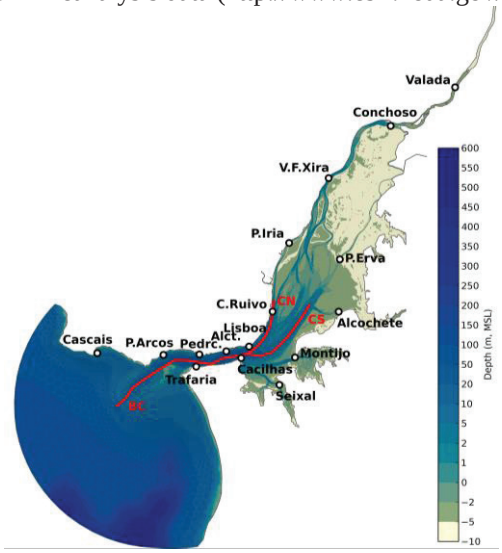


Fig. 1. Horizontal grid and bathymetry (MSL - mean sea level).

3.2. Scenarios definition

The scenarios definition aimed to represent extreme situations regarding the river flow, which is the main driver of the salinity in the Tagus estuary (Rodrigues *et al.*, 2016). Two scenarios were simulated based on the following periods: July 2005 and February 1979. In July 2005 the estimated average Tagus river flow was 22 m^3/s (estimation based on Macedo, 2006), although some uncertainty remains since for this period no data are available at Almourol or Ómnias stations. In contrast, in February 1979 the average river flow was 3730 m^3/s and 5464 m^3/s in Almourol and Ómnias, respectively (Macedo, 2006). For both scenarios, the simulations were performed for the present mean sea level and considering a mean sea level rise of 0.5 m.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Data-model comparison

Water levels data measured in 1972 were used to calibrate the model. Data and model results were both harmonically analysed and synthesised for eleven tidal constituents (Z0, MSF, O1, K1, N2, M2, S2, M4, MS4, M6, 2MS6). Root mean square errors ranged between 4 cm and 15 cm (Table I) showing that the model represents adequately the tidal propagation. At most stations, particularly the ones located upstream, these errors are lower than the ones from previous applications (Table I). The improvements obtained may result from the higher horizontal grid resolution, namely upstream, and the updates in the bathymetry (see Fortunato *et al.*, in prep.), both contributing for a better propagation of the tide, and from the model itself.

Table I. Root mean square errors (RMSE) of the water levels. The location of the stations is shown in Fig. 1.

	RMSE (cm) SCHISM3D	**RMSE (cm) SELFE 3D**
Cascais	3.6	1.8
P. de Arcos	4.6	5.8
Trafaria	10.7	9.6
Lisboa	7.6	10.8
Pedrouços	5.4	5.9
Cacilhas	3.9	6.4
Seixal	5.7	9.4
Montijo	8.8	12.2
Cabo Ruivo	9.7	13.5
Alcochete	7.3	12.3
P. Sta. Iria	8.6	17.3
Ponta da Erva	8.8	20.2
V. F. de Xira	15.1	21.5

Salinity and temperature were validated with data obtained along longitudinal profiles (Fig. 1, red lines) on February 1988 (Neves, 2010). Results show that the model reasonably represents the main patterns observed, namely the stratification of the water column (Fig. 2). The model, however, tends to overestimate the vertical mixing, in comparison with the observations that present a more pronounced stratification. A reduced stratification had already been observed in the previous applications (Costa *et al.*, 2012), but significant improvements were achieved in the present application. A reasonable agreement was also observed for temperature (results not shown), with significant improvements in comparison with the application by Costa *et al.* (2012), in particular regarding the thermal stratification. The improvements achieved are mainly related with the increase of the vertical grid resolution, from 20 SZ to 39 SZ levels, which reduced the simulated mixing in the water column.

A preliminary comparison with data measured at the Alcântara station (Fig. 1) also suggests that the model adequately represents the main salinity and temperature patterns observed, with errors of the same order of magnitude of those obtained by Rodrigues *et al.* (2016).

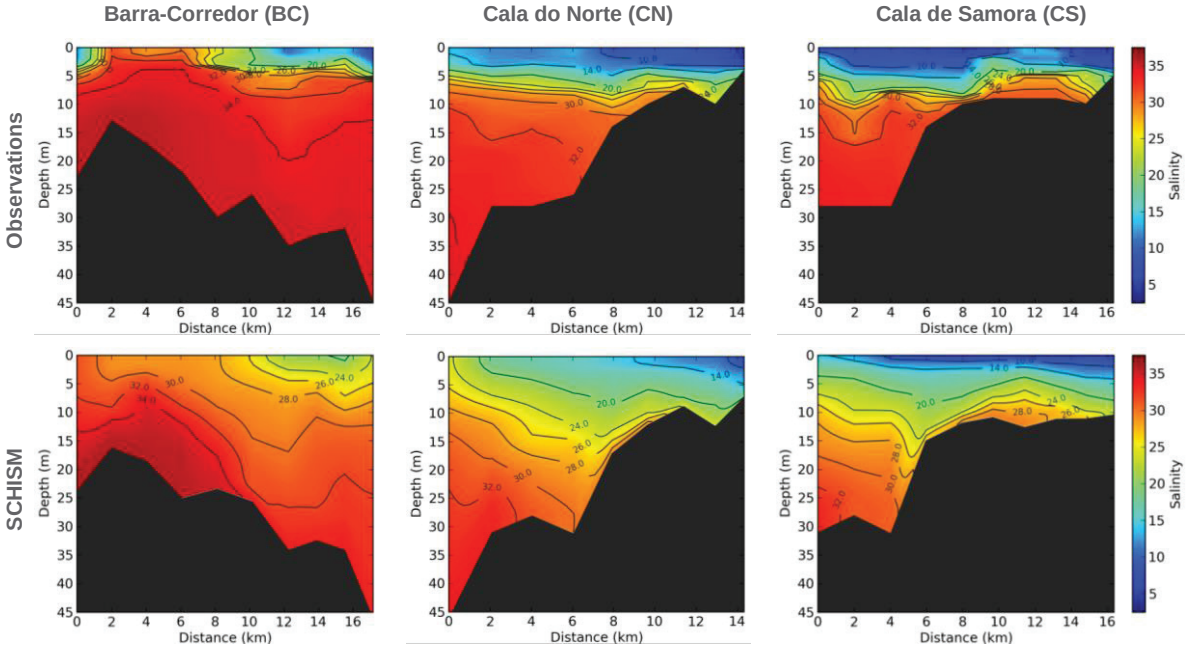


Fig. 2. Data-model comparison: vertical profiles of salinity measured during low-tide (February 11-13, 1988).

4.2. Salinity distribution and evolution

Salinity statistics were computed and the Tagus estuary was classified following the Venice system (after Carriker, 1967), which classifies waters with respect to the salinity into six classes: limnetic (freshwater, <0.5), oligohaline (0.5-5), mesohaline (5-18), polihaline (middle area, 18-25; lower area, 25-30), and euhaline (30-35).

Results show a pronounced progression of the saltwater upstream for low river discharges (Fig. 3). For the 2005 scenario most of the estuary presents polihaline or euhaline characteristics with mean salinities higher than 18 up to Vila Franca de Xira (Fig. 3). At the Conchoso station, where the water intake for irrigation is located, the simulated mean and minimum salinities were 9 and 3, respectively, preventing its use for agriculture (salinity < 1). Since some uncertainty remains regarding the river flow for the 2005 scenario due to the lack of data available, further analysis should proceed with a sensitivity analysis of salinity to low river flows. The 1979 scenario shows a contrasting situation with an extension of the limnetic area further downstream of Vila Franca de Xira (Fig. 4). For the 1979 scenario mean simulated salinity at Cascais was 30 (range: 15-36), comparatively with the mean salinity of 36 (range: 35-36) for the 2005 scenario.

Mean sea level rise scenarios suggest the propagation further upstream of the oligohaline and mesohaline areas (Fig. 3 and Fig. 4), and an increase of salinity at Conchoso of about 10% during low river discharge periods.

5. CONCLUSIONS

A new three-dimensional hydrodynamics baroclinic model was implemented and validated in the Tagus estuary. This model adequately represents the main patterns observed, with significant improvements from previous applications. A preliminary analysis to extreme river flows shows contrasting situations regarding the salinity distribution in the estuary, and a progression further upstream of the saltwater due to mean sea level rise. These results are a first contribution for the development of adaptation strategies to floods and droughts in the scope of the project BINGO.

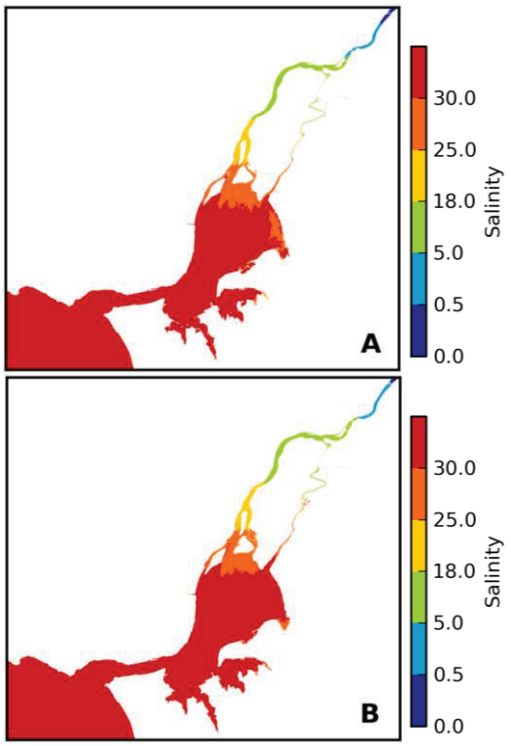


Fig. 3. Salinity classification in the Tagus estuary based on the Venice system regarding the 2005 scenario: present mean sea level (A), mean sea level rise of 0.5 m (B).

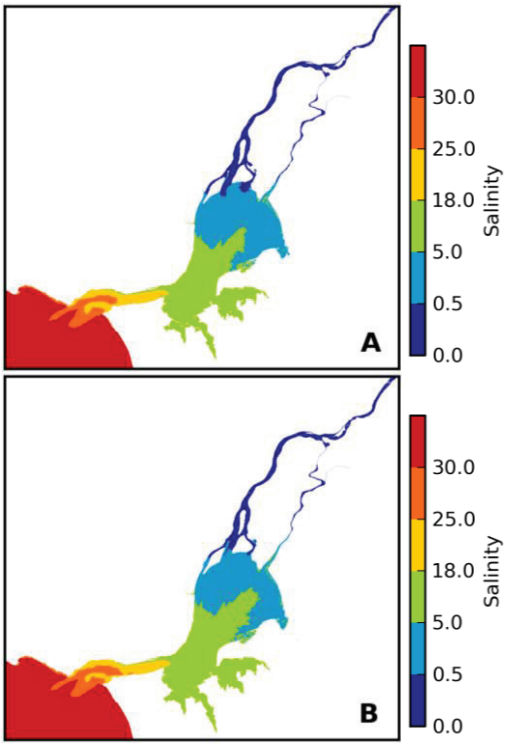


Fig. 4. Salinity classification in the Tagus estuary based on the Venice system regarding the 1979 scenario: present mean sea level (A), mean sea level rise of 0.5 m (B).

Acknowledgements

This study was funded by the EU's H2020 programme (Grant Agreement n. 641739) and by the FCT project UBEST (PTDC/AAG-AA/6899/2014). The first author was partly funded by the FCT (SFRH/BPD/87512/2012). This work used the resources from the FCT's National Distributed Computing Infrastructure. The authors thank the institutions that provided the data (IH, FCUL, APL, DGT, ABLGVFX, NOAA/OAR/ESRL PSD), and Han de Lange for treating the water levels results.

REFERENCES

Barbier, E.B., Hacker, S.D., Kennedy, C., Koch, E.W., Stier, A.C., Silliman, B.R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169-193.

Carriker, M.R. (1967). Ecology of estuarine benthic invertebrates: A perspective. Lauff G.H. (eds.) Estuaries. American Association for the *Advancement of Science*, 83, 442–487.

Costa, R.T., Rodrigues, M., Oliveira, A., Fortunato, A.B., David, L.M. (2012). Alerta precoce da contaminação fecal para o estuário do Tejo: implementação preliminar do modelo hidrodinâmico e de contaminação fecal. *Atas das 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 77-80.

Fortunato, A.B., Freire, P., Bertin, X., Rodrigues, M., Liberato, M., Ferreira, J. (in preparation). A numerical study of the February 15, 1941 Iberian storm in the Tagus estuary.

Fortunato, A.B., Li, K., Bertin, X., Rodrigues, M., Miguez, B.M. (2016). Determination of extreme sea levels along the Iberian Atlantic coast. *Ocean Engineering*, 111, 471–482.

Guerreiro, M., Fortunato, A.B., Freire, P., Rilo, A., Taborda, R., Freitas, M.C., Andrade, C., Silva, T., Rodrigues, M., Bertin, X., Azevedo, A. (2015). Evolution of the hydrodynamics of the Tagus estuary (Portugal) in the 21st century. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15(1), 65-80.

IPCC (2013). *Climate change 2013: The Physical science basis. Contribution of WG I to the 5th assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Stocker, T.F. et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge and New York, NY, p. 1535.

Macedo, M.E.Z. (2006). *Caracterização de Caudais, Rio Tejo*. CCDR de Lisboa e Vale do Tejo, Lisboa, 30 pp.

Neves, F.S. (2010). Dynamics and hydrology of the Tagus estuary: results from in situ observations. Ph.D. Thesis, University of Lisbon, 210pp.

Nogueira Mendes, R., Ceia, R., Silva, T., Rilo, A., Guerreiro, M., Catalão, J., Taborda, R., Freitas, M.C., Andrade, A., Melo, R., Fortunato, A.B., Freire, P. (2012). Remote sensing and intertidal cartography. MorFeed project. *Atas das 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 341-344.

Rodrigues, M., Costa, J., Jesus, G., Fortunato, A.B., Rogeiro, J., Gomes, J., Oliveira, A., David, L.M. (2013). Application of an estuarine and coastal nowcast-forecast information system to the Tagus estuary. *Proceedings of the 6th SCACR*, Lisbon, 10 pp.

Rodrigues, M., Rogeiro, J., David, L.M., Fortunato, A.B., Oliveira, A. (2016). Análise de sensibilidade à incerteza dos forçamentos na previsão da qualidade da água em tempo real. *Atas do 13º Congresso da Água*, Lisboa, 15pp.

Statham, P.J. (2012). Nutrients in estuaries - An overview and the potential impacts of climate change. *Science of Total Environment*, 434, 213-227.

Zhang, Y.J., Baptista, A. (2008). SELFE: a semi-implicit Eulerian–Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modeling*, 21 (3–4), 71–96.

Zhang, Y.J., Ye F., Stanev E.V., Grashorn S. (in review). Seamless cross-scale modeling with SCHISM, *Ocean Modelling*.

Satellite-derived SST and in situ observations assessment off the Portuguese marine waters

Ricardo Vicente (1), Rita Esteves (1), Luísa Lamas (1), José Paulo Pinto (1), Sara Almeida (1), Eduardo de Azevedo (2), Cecília Correia (3), Francisco Reis (4)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas 49 1249-093 Lisboa, Portugal, pires.vicente@marinha.pt.

(2) Universidade dos Açores, DCA - Centro do Clima, Meteorologia e Mudanças Globais, Rua Capitão João D´Ávila, Pico da Urze, 9700-042 Angra do Heroísmo, Portugal, eduardo.mv.azevedo@uac.pt.

(3) Administração dos Portos da Região Autónoma da Madeira, S.A., Gare Marítima do Porto do Funchal, 9004-518 Funchal, Portugal, ceciliacorreia@apram.pt.

(4) Observatório do Ambiente dos Açores, Rua Gaspar Corte Real, Freguesia da Sé, 9700-030, Angra do Heroísmo.

Abstract: Assessment of satellite-derived vs mooring buoys SST, in the Portuguese marine waters was performed here, aiming the future validation of the Sentinel-3 SLSTR data.
SST_{skin} retrieved from IR satellite radiometers on-board ERS 1-2, Envisat, and Aqua, and concurrent SST_{bulk} measured with 14 buoy thermistors located at ~1m depth were used to assess the statistical relationships between these datasets, with 20038 match-ups spanning from 1996 to 2015.
As expected, results showed consistency between SST_{skin} and SST_{bulk}, exhibiting correlations above 98 %. For (A)ATSR and MODIS day-time datasets, biases of + 0.15ºC and + 0.06ºC, respectively, point towards warmer satellite-derived skin temperatures, suggesting the existence of a stratified upper ocean throughout the solar day. Reversely, for the same radiometers night-time datasets, biases of - 0.25ºC and - 0.17ºC, respectively, reveal an inversion of the vertical thermal gradient during the night, causing a more homogeneous sea surface.

Key words: SST, validation, AATSR, MODIS, in situ buoys.

1. INTRODUCTION

As part of the Eastern Atlantic border, the Iberian Peninsula coast is characterized by a dynamic system dominated by upwelling regimes and colder water seaward filaments strengthening with northerly summer winds followed by relaxation and flow inversion periods, as outlined in Fiuza *et al.* (1982), Relvas *et al.* (2007) and da Silva & Silva (2012). In contrast, Bashmachnikov *et al.* (2004) shows that the Madeira archipelago waters are considered more stable and warmer along the year and the Azores archipelago is characterized by a complex current system that causes strong horizontal temperature gradients. These three regions, extending from subtropical to mid-latitudes, compose the region of interest (ROI) in this study.

In the Portuguese marine waters, shown in Fig.1, there exists an integrated permanent monitoring system, which includes oceanographic and meteo-oceanographic mooring buoys equipped with temperature sensors. Starting in 1986, temperature measurements from coastal and offshore buoys belonging to the national network are available with some sparse gaps, nonetheless, providing ground truth to validate satellite temperature retrievals. Undoubtedly, satellite-derived SST, acquired by high temporal resolution remote radiometers, provides the means to continuously assess wide oceanic areas. As technology improves and ground pixels get to spatial resolution of ~ 1 km, we push the validation of SST data towards coastal regions.

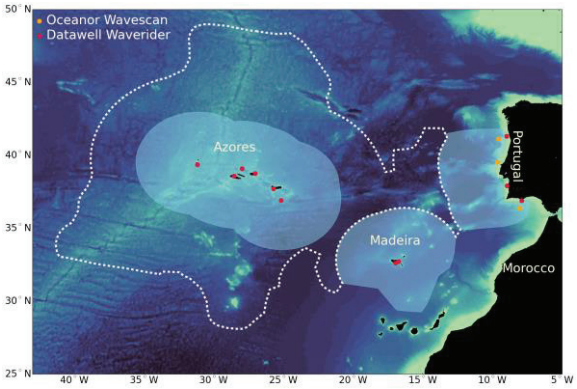


Fig. 1. Portuguese marine waters showing the 14 coastal and offshore mooring buoys (red & orange dots).

This paper assesses Satellite-based SST estimates from thermal infrared (IR) sensors against temperature measured by a set of mooring buoys across the Portuguese mainland and the Madeira and Azores archipelagos. Although thermal IR frequencies are more affected by clouds, aerosols and water vapour, they provide better spatial resolution and are less sensitive to coastal proximity than microwave ones. Thus, we use Envisat´s Advanced Along-Track Scanning Radiometer (AATSR) data and its on-board ERS 1-2

predecessors Along-Track Scanning Radiometers (ATSR 1-2), as well as Aqua´s Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS).

We also intend to show the SST measurements availability of the Portuguese integrated monitoring system, filling in an area of relatively scarce *in situ* observations. These data have the potential of improving the radiative transfer models based on regression algorithms and depict gross errors, hence stimulating its usability to calibrate satellite data retrievals in the Eastern Atlantic region (Corlett *et al.*, 2006). Despite the robustness, against atmospheric aerosols, of the along track scanning dual-view technique, the data and derived products attained through the on-board Sentinel-3 Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR) could benefit from such *in situ* SST observations.

2. FRAMEWORK AND DEFINITIONS

The Group for High Resolution SST (GHRSST) developed a theoretical framework for better understanding the near surface temperature structure complexities, in the first 10 meters, and the relationships between SST observations made by different instruments (The GHRSST-PP International Project Office, 2008). Here, we adopted the GHRSST definitions marked in Fig.2.

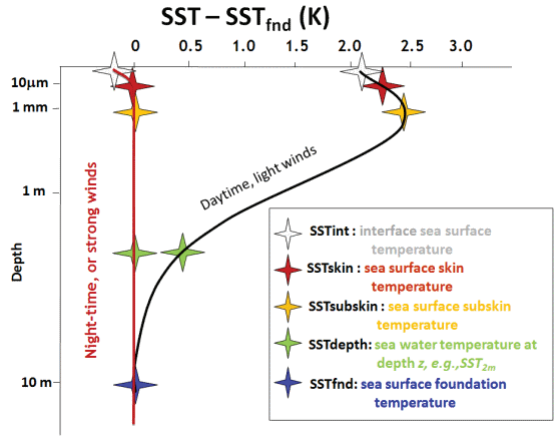


Fig. 2. Hypothetical vertical profiles of temperature for the upper 10m of the ocean surface in high wind speed conditions or during the night (red) and for low wind speed during the day (black) (After Donlon et al., 2002 and The GHRSST-PP International Project Office, 2008).

The sea surface skin temperature (SST_{skin}) is defined as the temperature retrieved by an IR radiometer from a ~500 µm thin ocean layer. The sea water temperature at depth (SST_{depth}) is defined as the subsurface temperature measured with deep thermistors installed in a variety of *in situ* platforms (Donlon *et al.*, 2002). In this study, we evaluate the differences between the SST_{skin} derived from satellite radiometers and the SST_{depth} measured with buoy sensors located at ~1m and refer to this temperature as SST_{bulk}.

The remaining SST definitions in Fig. 2 and further explanations can be found in Donlon *et al.* (2002) and The GHRSST-PP International Project Office (2008).

3. DATASETS

This section describes the *in situ* and satellite datasets used in the paper. The data were selected in accordance with specific requirements, such as the availability of the highest quality level, the spatial resolution and the temporal range. All temperatures are shown in degree Celsius (º C).

3.1 In situ data

Mooring oceanographic Datawell Waverider and meteo- oceanographic Oceanor Wavescan buoys are located in coastal and offshore regions of interest and close to harbour entrances (Fig. 3).



Fig. 3. Oceanographic Datawell Waverider (left) and Meteo-oceanographic Oceanor Wavescan (right) buoys (image © Instituto Hidrográfico).

The Waverider buoy SST data were acquired, with internal temperature sensors located at ~ 0.7 m depth, at a sample rate of 30 min, while the Wavescan buoy data were acquired, with Aanderaa 4050 temperature sensors located at ~ 1 m depth, at a sample rate of 1 hr. Upon reception, data follows a validation procedure and are loaded into transactional local databases.

3.2 Satellite data

(A)ATSR multi-mission archive data were reprocessed by the ATSR Reprocessing for Climate (ARC) project (Merchant *et al.*, 2012). The present research uses the ARC_L2P imagery, from Envisat and ERS 1-2, which comprises daily SST Level-2 pre-processed data products from the third reprocessing ARC endeavour, with 1km of spatial resolution, using a dual-view two-channel algorithm (D2) or a dual-view three-channel algorithm (D3). The latter exists for night-time dataset only (See more details at ENVISAT-1 Products Specifications, 2013 and ARC_L2P Product Guide, 2013). For the ROI, 2208 buoy-(A)ATSR match-ups were found with the highest GHRSST Data Specification (GDS) quality levels of 5 (best) and 4 (acceptable), within a spatial radius of 1 nautical mile (NM, ~ 1.85km) and a temporal difference variable from 30 min to 3 hrs.

MODIS Aqua L2 SST and SST4 data, available at Feldman *et al.*, (2014), were also used, corresponding to daily Level 2 SST 11µm day-time and daily SST 4µm night-time dataset, with a spatial resolution of 1km. For the ROI, 17830 buoy-MODIS match-ups were found with the highest SST and SST4 quality retrieval of 0 (highest) and 1 (good), within a spatial radius of 1 NM and a temporal difference variable from 30 min to 3 hrs.

The MODIS has a viewing swath width of 2330 km, while the swath width of (A)ATSR sensors is 500 km. Hence, it is expected that the MODIS datasets generate more observations than the (A)ATSR ones, for the same atmospheric conditions and similar orbit typology . The comparison between SST_{bulk} measured *in situ* and SST_{skin} retrieved from remote sensors resulted in a total of 20038 match-ups within the ROI.

Data were analysed in four different modes: (A)ATSR day- and night-time containing information from ATSR 1&2 and AATSR from the ARC project; and MODIS day- and night-time comprising SST 11µm day-time and SST 4µm night-time (Fig. 4).

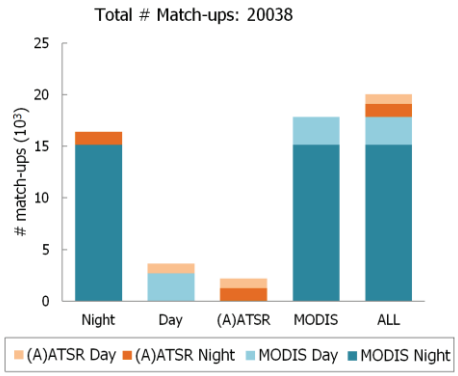


Fig. 4. Number of observed day & night match-ups per satellite sensor.

4. CONCLUSIONS AND DISCUSSION

SST_{skin} minus SST_{bulk} was computed to assess biases, shown in Figs. 5 and 6.

Figure 5 shows the (A)ATSR datasets adjustment to the regression with an overall correlation coefficient (r) of 98%. A bias of + 0.15ºC and a root mean square error (RMSE) = 0.65ºC for day-time suggests warmer satellite skin retrieval, contra the night-time ensemble attaining a bias of - 0.25ºC and a RMSE = 0.41ºC, implying a cooler skin retrieval.

MODIS datasets analysis in Fig. 6 reveal closer agreements, yet the same interpretations, showing a linear dependence between variables r = 99%, a bias of + 0.06ºC and a RMSE = 0.53ºC for day-time and a bias of - 0.17ºC and a RMSE = 0.38ºC for night-time.

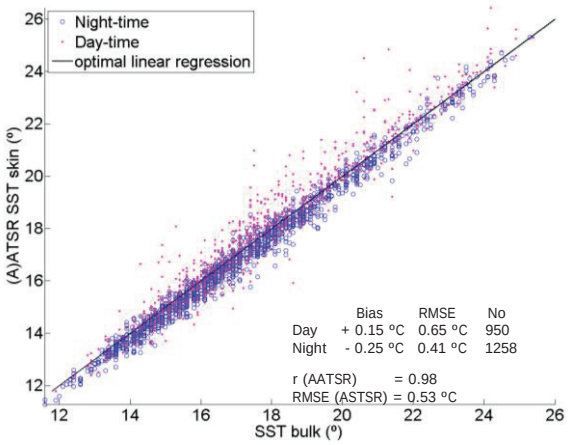


Fig. 5. (A)ATSR SST_{skin} vs SST_{bulk} linear regression for Day (magenta dots) and Night-time (blue circles) datasets. Solid black shows a theoretical optimal linear regression.

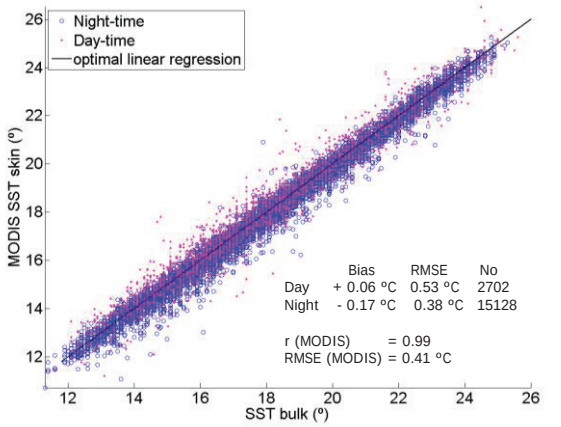


Fig.6. MODIS SST_{skin} vs SST_{bulk} linear regression for Day (magenta dots) and Night-time (blue circles) datasets. Solid black shows a theoretical optimal linear regression.

Positive biases for day-time and negative biases for night-time, point towards warmer satellite-derived skin temperatures than depth measurements, suggesting the existence of a stratified upper ocean, throughout the solar day and an inversion of the thermic gradient during the night, causing a more homogeneous sea surface.

Results show the feasibility of using the mooring buoys SST_{bulk} measurements off the Portuguese marine waters to validate satellite-based SST retrievals and assess gross errors, namely for the SLSTR on-board Sentinel-3. The statistical analysis evidences an overall strong agreement between both datasets, even though high-quality validation requirements are yet far-off.

Vertical thermal gradients at the upper ocean, assessed with this methodology, are of potential interest for the research applications under the Coastal Waters Research Synergy Framework (Co-ReSyF) project.

5. FUTURE DEVELOPMENTS

The comprehensive buoy measurements dataset used in this research can be split into two sub-datasets,

depending on the sea surface stratification, therefore dependent of the surface wind speed and wave field. Providing adequate sensor calibrations are maintain, a first sub-dataset, comprising data when the intensity of the surface wind speed is greater than 6 m/s (Donlon *et al.*, 2002), thus inducing a mixed surface layer, would satisfactorily support direct comparisons between skin and depth SST. A second sub-dataset, containing data when the surface wind speed is lower than 6 m/s, inducing a stratified upper ocean, would be helpful to depict the vertical thermal gradients.

This analysis is particularly relevant to the studied region, due to the high solar radiation indexes and the seasonality of the wind magnitudes. All the meteo-oceanographic buoys used here provide *in situ* surface wind measurements, setting the ground for additional research iterations. Furthermore, the meteorological temperature sensor located at ~4 m above sea level, in these buoys, might add more information about the convective heat fluxes at the air-sea interaction.

Other research steps involving assessment of the registered biases in the three distinct geographical regions, the mainland and the archipelagos, ought to be considered seasonally- and climatologically-wise.

Acknowledgements

The authors wish to acknowledge the assistance provided by Dr. Ana Sutcliffe, Mr. Paul Mota and Mr. Dmitri Boutov.

Buoy datasets were obtained from the Portuguese Hydrographic Institute in the framework of MONIZEE program, the University of Azores under the framework of the ESTRAMAR project (MAC-FEDER), the Observatory for the Environment of the Azores and the Ports Administration of the Madeira Autonomous Region local databases.

(A)ATSR from ERS 1-2 and Envisat ARC_L2P data were obtained through project No 72978 from the European Space Agency (ESA), accessed from ftp://ats-ftp-ds.eo.esa.int.

MODIS Aqua Level 2 data were obtained from the NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Distributed Active Archive Center; (2014): Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Ocean Color Data, NASA OB.DAAC. Available at http://oceancolor.gsfc.nasa.gov, accessed on April 2016.

Co-ReSyF project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 687289.

REFERENCES

ARC_L2P Product Guide, Issue 1.3, 1 September 2013. Available at *https://earth.esa.int/documents/10174/56700/L2P_Product_Description* (as of 29 April 2016).

Bashmachnikov, I., V. Lafon & A. Martins (2004). Sea surface temperature distribution in the Azores region. Part II: space-time variability and underlying mechanisms. *Arquipélago*, Life and Marine Sciences 21A: 19-32.

Corlett, G. K., Barton, I. J., Donlon, C. J. et al. (2006). The accuracy of SST retrievals from AATSR: An initial assessment through geophysical validation against in situ radiometers, buoys and other SST data sets. *Advances in Space Research*, 37(4), 764-769, doi:10.1016/j.asr.2005.09.037.

Donlon, C. J., Minnett, P. J., Gentemann, C., Nightingale, T. J., Barton, I. J., Ward, B., & Murray, M. J. (2002). Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research. *Journal of Climate*, 15(4), 353-369.

ENVISAT-1 Products Specifications Vol 7: AATSR Products Specifications, Issue 4/C, 5 September 2013. IDEAS-SER-IPF-SPE-0288. Available at *https://earth.esa.int/documents/10174/437508/Vol-07-Aats-4C.pdf* (as of 29 April 2016).

Feldman, G. C., C. R. McClain, Ocean Color Web, MODIS Reprocessing 2014.0, NASA Goddard Space Flight Center. Eds. Kuring, N., Bailey, S. W. *http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/* (April 2016).

Fiuza, A., Macedo M. & Guerreiro, M. (1982). Climatological space and time variation of the Portuguese coastal upwelling. *Oceanologica*, Acta 5, 31–40.

Merchant C. J., Embory, O., Rayner, N.A. et al. (2012). A 20 year independent record of sea surface temperature for climate from Along-Track Scanning Radiometers, *J. Geophys. Res.*, 117, C12013, DOI:10.1029/2012JC008400

Relvas P., E.D. Barton, J. Dubert, P.B. Oliveira, A. Peliz, J.C.B. da Silva & A.M.P. Santos (2007). Physical oceanography of the western Iberia ecosystem: Latest views and challenges. *Progress in Oceanography*, 74, 149-173.

da Silva, A.J. & Silva, F.S. (2012). Caracterização do regime térmico das águas marinhas portuguesas com base nos registos das boias ondógrafo. In Proc. *´3as Jornadas Engenharia Hidrográfica´*, Portuguese Hydrographic Institute, Lisbon, Portugal, 205-207.

The GHRSST-PP International Project Office (2008). GHRSST-PP Science & Applications. Online at *https://www.ghrsst.org/science-and-applications/sst-definitions/* (as of 29 April 2016).

Non-linear infra-gravity and sea-swell wave-wave interactions at S. Jacinto beach

D. Mendes (1,2,3), A.A. Pires-Silva (1), J. Pinto (2) and A.B. Fortunato (3)

(1) CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, ddiogosm@gmail.com

(2) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas nº49, 1249-093 Lisboa

(3) Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Abstract: Non-linear wave-wave interactions between sea-swell waves ($0.5 < f < 0.04$ Hz) and infra-gravity waves ($0.04 < f < 0.004$ Hz) are studied in detail from field data using bispectral analysis. This methodology allowed to understand the direction and magnitude of the non-linear energy transfers within the spectrum. Field measurements of pressure data were collected at S. Jacinto beach during a full tidal cycle on a cross-shore transect at the subtidal and intertidal zone. Bispectral estimates showed triad interactions between two sea-swell waves and one infra-gravity wave at the surf zone. The non-linear transfers were out of phase which indicates the presence of bound waves. These results evidenced the presence of energy transfers from infra-gravity to sea-swell band where the sea-swell waves are more energetic, during shoaling and breaking.

Key words: Infra-gravity waves, non-linear wave-wave interactions, bispectral analysis, wave observations.

1. INTRODUCTION

Low-frequency motions with periods between 25 and 250 s are known as infra-gravity waves (IG). They were first observed in the field by Munk (1949) and Tucker (1950). Since then, many field campaigns, laboratory experiments and numerical modelling were performed to study these small-amplitude waves and to assess their impact on coastal circulation (e.g., Herbers *et al*., 1995; Van Dongeren *et al*., 2007; Ruju *et al*., 2012).

Currently, it is widely accepted that IG waves become dominant in the inner surf zone (De Bakker *et al*., 2014). In that zone, the energy of sea-swell waves has already been dissipated and IG waves start to shoal towards the shore. At the coastline, it is expected that such small amplitude waves are capable to reflect seawards without losing energy. However, IG dissipation was observed and several mechanisms were proposed, such as bottom friction (Henderson and Bowen, 2002) and depth-induced breaking (Van Dongeren *et al*., 2007).

Ruju *et al*. (2012) also proposed that non-linear energy transfers between IG waves and sea-swell waves are important where the sea-swell waves are dominant. This study was performed based on numerical modelling using the IH-2VOF model (Lara *et al*., 2011). Such an accurate model can provide a good approximation but this conclusion should be verified with field measurements.

Therefore, the study presented herein aims to verify the non-linear wave-wave interactions at the shoaling zone, thereby extending the study of Ruju *et al*. (2012) with field measurements.

2. FIELD CAMPAIGN

The field experiment was performed from 17 to 19 of June 2015 at S. Jacinto beach, NW Portugal. This beach is located northwards of the Aveiro inlet jetties. The sediments are characterized by fine sand with a mean sediment diameter of 0.2 mm.

Several instruments were deployed during this field campaign (Mendes *et al*., 2015). For the purpose of this study, we are going to focus only on two of the eight pressure sensors moored from 8h00 of 18 June to 2h00 of 19 June, 2015 (Figure 1).

These sensors were moored in a cross-shore transect from 6 m to 2.5 m depth chart datum (CD). They had a sampling frequency of 2 Hz and they were attached to a steel tube fixed to a concrete base. Bathymetry was collected by boat and topography with a real time kinematic GPS mounted on a quad-bike.

3. METHODS

Non-linear interactions between waves with different frequencies cannot be detected by using the traditional Fast Fourier Transform (FFT). However, they can be detected by using bispectral analysis which is a spectral analysis similar to the FFT but using second-order theory (Hasselman *et al*., 1963; Collis *et al*., 1998). The discrete bispectrum is defined as:

$$B_{f1,f2} = E[A_{f1}A_{f2}A_{f1+f2}]$$

where *E[]* is the ensemble average of the triple product of complex Fourier coefficients A at the frequencies *f1*, *f2* and their sum.

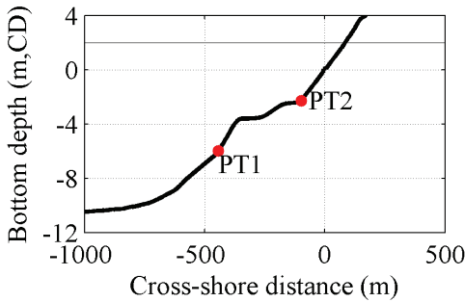


Fig. 1. Instruments position, cross-shore profile and mean sea level (horizontal grey line) at S. Jacinto beach in meters and referenced to chart datum.

This methodology can detect the phase coupling between the three frequency components in a triad (*f1*, *f2* and *f1+ f2*). Since the coefficients A are complex, $B_{f1,f2}$ has a real and an imaginary part. According to Doering and Bowen (1986), the imaginary part provides a measure of the non-linear energy transfers and this part will be used hereafter. A positive value indicates energy transfer from *f1* and *f2* to *f3* and a negative value, from *f3* to both *f1* and *f2* (De Bakker *et al*., 2015).

Here, we analyzed 2 h of data centred on the high tide as in De Bakker *et al*. (2014). These data were divided into blocks of 20 min and the bispectral estimates were averaged over 7 frequencies. This resulted in a frequency resolution of 0.0058 Hz, 154 degrees of freedom and 95% confidence interval for non-bicoherence of 0.197 (Haubrich, 1965).

4. RESULTS

Bispectral analysis was applied to both PTs during high-tide (Figures 2 and 3). Non-linear energy transfers were stronger for PT2 (top panels of Figures 2 and 3). These interactions in PT2 between peak frequencies (*fp*) at B(0.09, 0.09) induced a positive transfer to higher harmonics at *f* = 0.18 Hz. Contrastingly, at PT1 the negative value at B(0.09,0.09) corresponds to transfer energy back from the higher harmonic (*f* = 0.18 Hz) to *fp*.

There were also interactions between *fp* and IG frequencies (*f* < 0.04 Hz). While it seems that for PT1, the positive are similar to negative transfers, for PT2, they were mainly positive with a value close to the transfer around *fp*. In other words, at B(0.09, 0.005-0.008) energy is transfer to *f* = 0.095-0.098 Hz.

Bicoherence gives a normalized measure of the triad interactions (middle panels of Figures 2 and 3). These interactions were stronger for *fp* and super-harmonics of *fp*. Triad interactions between *fp* and IG frequencies were null.

Finally, biphase provides a normalized measure of the phase relation between the several frequencies (bottom panels of Figures 2 and 3) but their value is only significant if bicoherence is greater than zero (Elgar and Guza, 1985). Frequencies of *fp* and their super-harmonics are interacting with zero phase lag.

There were some interactions between *f* = 0.05 Hz and several IG frequencies in PT1 that occurred in phase.

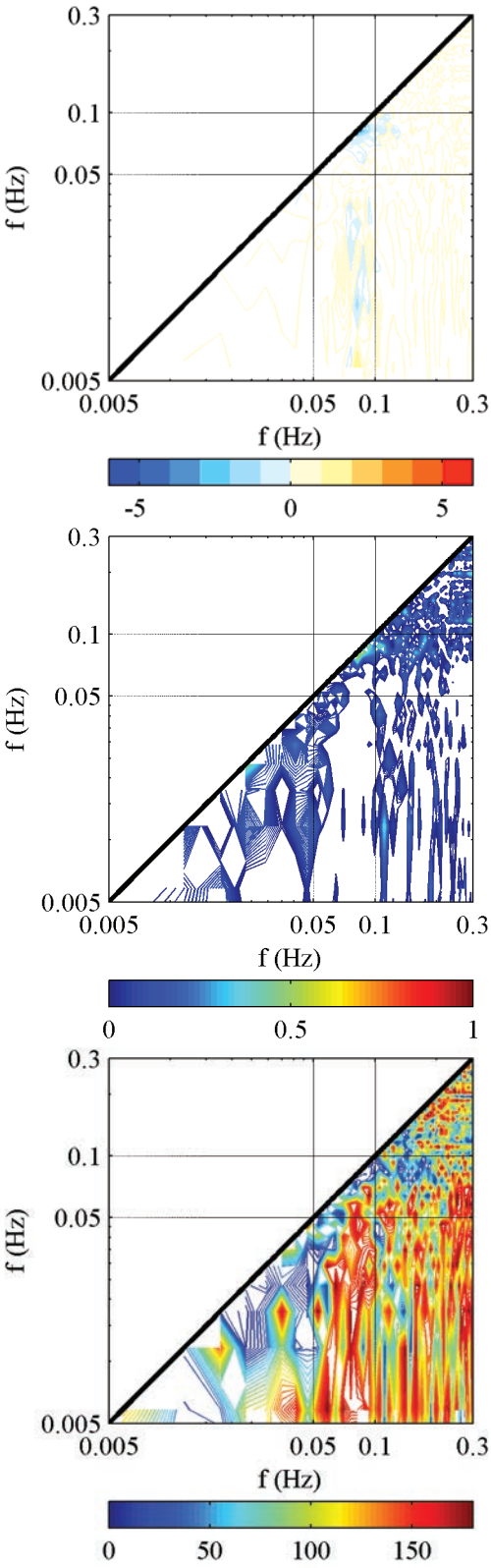


Fig. 2. Imaginary part (x10^{-5}) of the bispectrum (top), bicoherence values within 95% confidence interval (middle) and absolute value of the biphase (bottom) for PT1 around high-tide.

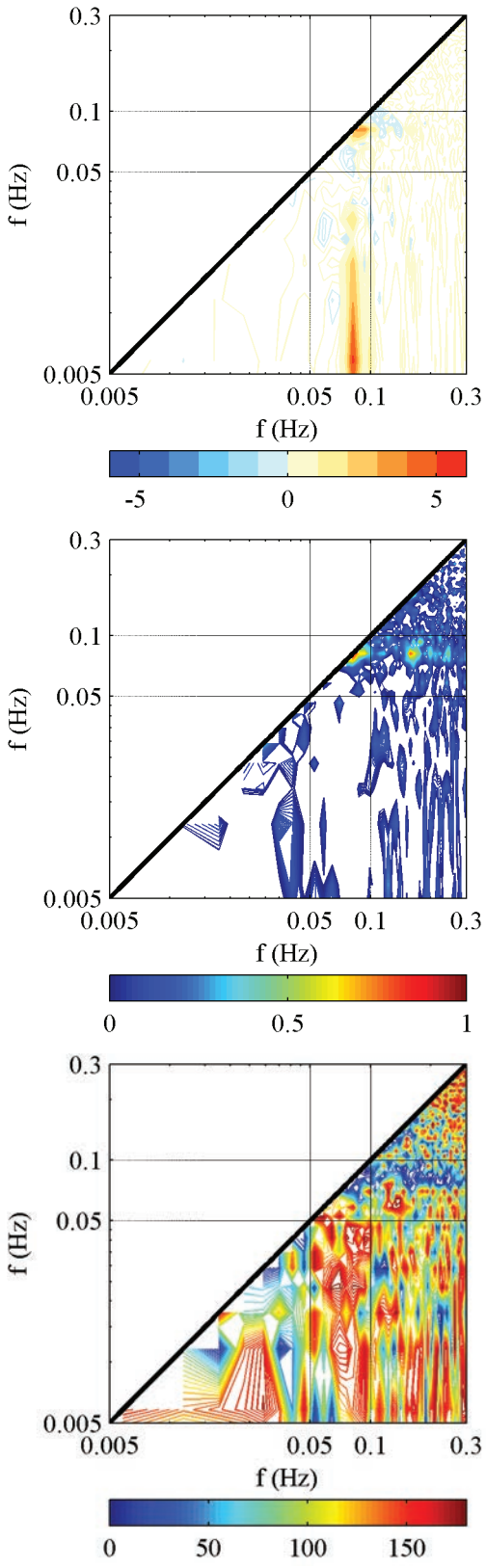


Fig. 3. Imaginary part (x10^{-5}) of the bispectrum (top), bicoherence values within 95% confidence interval (middle) and absolute value of the biphase (bottom) for PT2 around high-tide.

5. DISCUSSION

Non-linear interactions around *fp* and their super-harmonics were as expected in such depths. These interactions are characterized by triad interactions in phase which indicates that super-harmonics are generated from the *fp* interactions.

Non-linear interactions between IG and *fp* frequencies were stronger and positive for PT2. These interactions are a clear evidence of non-linear interactions between *fp* and IG waves that are transferring energy around *fp*.

Biphase estimates for *fp* were in phase and it seems that some IG frequencies occurred also in phase. Last evidence may correspond to interactions between two IG waves.

6. CONCLUSIONS

Non-linear wave-wave interactions between SS and IG waves at the surf zone were verified using bispectral analysis. Non-linear interactions between SS waves and IG waves occurred indeed where SS waves still dominate. Further integration over each frequency should be calculated in order to quantify the non-linear energy source term input for wave spectral numerical models.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge all the participants in the field campaign. Thanks also to Anouk de Bakker who kindly sent us the bispectral code. This research is a contribution to project RAIA.CO (0520_RAIA_CO_1_E), Observatório Marinho da Margem Ibérica e Litoral, funded by the European Fund for Regional Development (EFDR) through the Programa Operacional de Cooperação Transfonteiriça Espanha-Portugal (POCTEC). The first author acknowledges a PhD fellowship granted by Fundação para a Ciência e Tecnologia, (FCT), the Portuguese funding agency (grant PD/BD/114463/2016).

REFERENCES

Collis, W. B., White, P. R., & Hammond, J. K. (1998). Higher-order spectra: the bispectrum and trispectrum. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 12, 375-394.

De Bakker, A. T. M., Tissier, M. F. S., & Ruessink, B. G. (2014). Shoreline dissipation of infragravity waves. *Continental Shelf Research*, 72, 73-82.

De Bakker, A. T. M., Tissier, M. F. S., & Ruessink, B. G. (2015). Beach steepness effects on nonlinear infragravity-wave interactions: A numerical study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 554-570.

Doering, J. C., & Bowen, A. J. (1986). Shoaling surface gravity waves: A bispectral analysis. *In Proc. 20th Int. Conf. Coastal Engineering* Taiwan, pp. 150-162.

Elgar, S., & Guza, R. T. (1985). Observations of bispectra of shoaling surface gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 161, 425-448.

Hasselman, K., Munk, W., MacDonald, G. (1963). Bispectra of Ocean Waves. *Time-Series Analysis*, 125-139.

Haubrich, R. (1965). Earth noises, 5 to 500 milicycles per second, 1. *Journal of Geophysical Research*, 70, 1414-1427.

Henderson, S. M., & Bowen, A. J. (2002). Observations of surf beat forcing and dissipation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107, 1-14.

Herbers, T. H. C., Elgar, S., & Guza, R. T. (1995). Generation and propagation of infragravity waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100, 24863-24872.

Lara, J. L., Ruju, A., & Losada, I. J. (2011). Reynolds averaged Navier–Stokes modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 467, 1215-1242.

Mendes, D., Pinto, J. P. and Jorge da Silva, A. (2015). Application of an operational model to forecast near-shore circulation: the case study of S. Jacinto beach. *Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia (CNCG15) – Ordem dos Engenheiros*. Academia Militar, 29 e 30 de Outubro 2015, Lisboa.

Munk, W. H. (1949). Surf beats. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 30, 849-854.

Ruju, A., Lara, J. L., & Losada, I. J. (2012). Radiation stress and low-frequency energy balance within the surf zone: A numerical approach. *Coastal Engineering*, 68, 44-55.

Tucker, M. J. (1950). Surf beats: sea waves of 1 to 5 min. period. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 202, 565-573.

Van Dongeren, A., Battjes, J., Janssen, T., Van Noorloos, J., Steenhauer, K., Steenbergen, G., & Reniers, A. J. H. M. (2007). Shoaling and shoreline dissipation of low-frequency waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C2).

Observations of infra-gravity waves at S. Jacinto beach

D. Mendes (1,2,3), A.A. Pires-Silva (1), J. Pinto (2) and A.B. Fortunato (3)

(1) CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, ddiogosm@gmail.com.

(2) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas nº49, 1249-093 Lisboa.

(3) Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Abstract: Generation mechanisms of infra-gravity motions are analysed using field observations at S. Jacinto beach. These observations were, tipically, bottom-pressure time series collected in June 2015 during a full spring tidal cycle from the subtidal to the intertidal zone. Bound wave and breakpoint generation mechanisms were assessed using the parameters proposed in the available literature. The results put in evidence the importance of infra-gravity wave energy close to the shoreline. An increase of up to 0.42 m was estimated. The clearest generation mechanism was the bound wave release. The breakpoint generation also contributed but to a less extent and only during high-water.

Key words: Infra-gravity waves, bound wave release, breakpoint generation, wave observations, surf beat.

1. INTRODUCTION

Low frequency waves with periods between 25 and 250 s are known as infra-gravity waves (IG). There are two widely accepted mechanisms for the generation of these waves: the bound wave release and the breakpoint modulation. The former is based on a sea-swell (SS) wave group that forces an IG wave which propagates out of phase and has the length of the wave group (Longuet-Higgins and Stewart, 1962). In the latter, the spatial and temporal variation of the breaking point generates an IG wave that propagates both seawards and shorewards (Symonds *et al*., 1982; Schaffer, 1993).

Bound wave release dominates on mild slopes and IG waves can dissipate part of their energy close to the coastline (De Bakker *et al*., 2014). On steeper slopes, where the breakpoint modulation mechanism is predominant, IG waves are usually fully reflected from the coast.

Battjes *et al*. (2004) studied the relative importance of each generation mechanism and proposed a coefficient (β) that combines the infra-gravity wave period, the water depth and the beach slope. These authors indicated that the bound wave mechanism is dominant for $\beta < 0.06$ and the breakpoint mechanism for $\beta > 0.30$. Baldock (2012) suggested a kind of surf beat similarity parameter (ξ_{IG}) which indicates the type of surf beat likely to dominate in different conditions. This author stated that low ξ_{IG} values are associated with bound waves induced by SS wave groups and high ξ_{IG} values mean that the breakpoint mechanism will be responsible for the infra-gravity pattern. To our best knowledge, a specific study to understand and characterize the IG wave's generation processes at the Portuguese coastline has not yet been made.

This study aims to characterize the dominant IG generation mechanisms using the previously mentioned parameters at S. Jacinto beach based on field measurements.

2. FIELD CAMPAIGN

The field campaign was carried out from 17 to 19 of June 2015 at S. Jacinto beach. This beach is located North of the Aveiro jetted inlet. The beach slope is mild (1:80) which imply a dissipative beach with a wide surf zone. Sediments can be characterized as fine sand with a mean sediment diameter of 0.2 mm.

During the field campaign several instruments were deployed at the subtidal and intertidal zone (Mendes *et al*., 2015). In this study, only results from the instruments shown in Figure 1 are presented.

Two pressure transducers (PT) recorded bottom pressure values with a 2 Hz sampling frequency in a continuously mode during almost one and a half tidal cycle. The acoustic Doppler velocimeter (ADV) recorded 3D velocities and bottom pressure with a 8 Hz sampling frequency. The deployment only allowed the ADV to record half of the tidal cycle centred on the high-tide.

The bathymetry was measured by boat and topographic levels were collected by a real-time kinematic GPS mounted on a quad bike during low tide.

During the field campaign, offshore wave conditions were moderate with a maximum of sea-swell significant wave height ($Hm0_{SS}$) of 2 m. By the end of June 17 a swell-event reached the field site at the end of 17 June with a maximum peak wave period (Tp) of 13 s and it persisted until the beginning of June 19. The mean wave direction (Dir) parameter was confined to a sector between 300ºN and 315ºN

throughout the experiment. Tidal level varied between 0.6 and 3.4 m chart datum (CD).

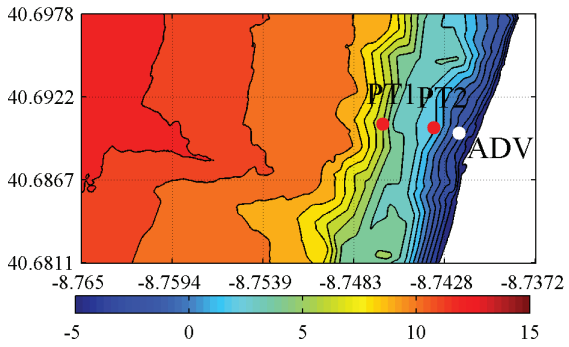


Fig. 1. Topo-bathymetry of S. Jacinto beach in meters (CD) and instrument positions.

3. METHODOLOGY

The analysis of the bottom pressure time series took into account the atmospheric pressure correction and the calibration curve of each sensor. It was also considered the attenuation of pressure in depth for each frequency with a maximum factor of 4 to prevent overestimation of higher frequencies (Tucker and Pitt, 2001). Sea surface elevation time series were obtained from this corrected pressure records and spectral estimates were calculated every 20 min using de-trended time series of sea-surface elevation. Each 20 min of data was divided into blocks with 50% of overlap. A fast Fourier transform was applied and it resulted in 20 degrees of freedom and a spectral resolution of 0.0039 Hz. IG and SS wave bulk parameters were obtained within the [0.005-0.05 Hz] and [0.05-0.5 Hz] intervals, respectively.

As above mentioned, two additional parameters were calculated to shed light on the generation mechanism that is the source of IG wave energy at S. Jacinto beach. The Battjes *et al*. (2004) parameter (β) can be defined as:

$$\beta = \alpha/\omega(g/h)^{1/2} \qquad (1)$$

where α is the bottom slope, ω the wave radian frequency of the IG wave, g the gravitational acceleration and h is the mean water depth. The beach slope of S. Jacinto beach is 1:80, the wave radian frequency was chosen as the inverse of the mean period for the IG wave band ($Tm02_{IG}$). The β parameter was calculated for each record (every 20 min).

Baldock (2012) proposed the surf beat similarity parameter (ξ_{IG}) which is defined as:

$$\xi_{IG} = \alpha/\omega(g/h)^{1/2}(Hm0_{SS}/L_{SS})^{1/2} \qquad (2)$$

where the L_{SS} is the wavelength. The wavelength was obtained using the peak frequency of the SS band (fp) at the mean water depth. This parameter was also calculated every 20 min. Equations 1 and 2 will be further applied to data measured in the field campaign.

4. ANALYSIS OF RESULTS

The time evolution of the variance spectral density shows that a significant part of the wave energy is located on the SS band (Figure 2). SS energy associated with the peak frequency (fp = 0.09 Hz) was higher for PT1 (Figure 2 – top) when compared to PT2 (Figure 2 – middle) and ADV (Figure 2 – bottom). Super-harmonics start to develop at PT1 but they were more pronounced and tide-dependent at PT2. The IG energy band reached up to 0.1 m^2Hz^{-1} at both PTs but was higher at ADV (up to 1 m^2Hz^{-1}).

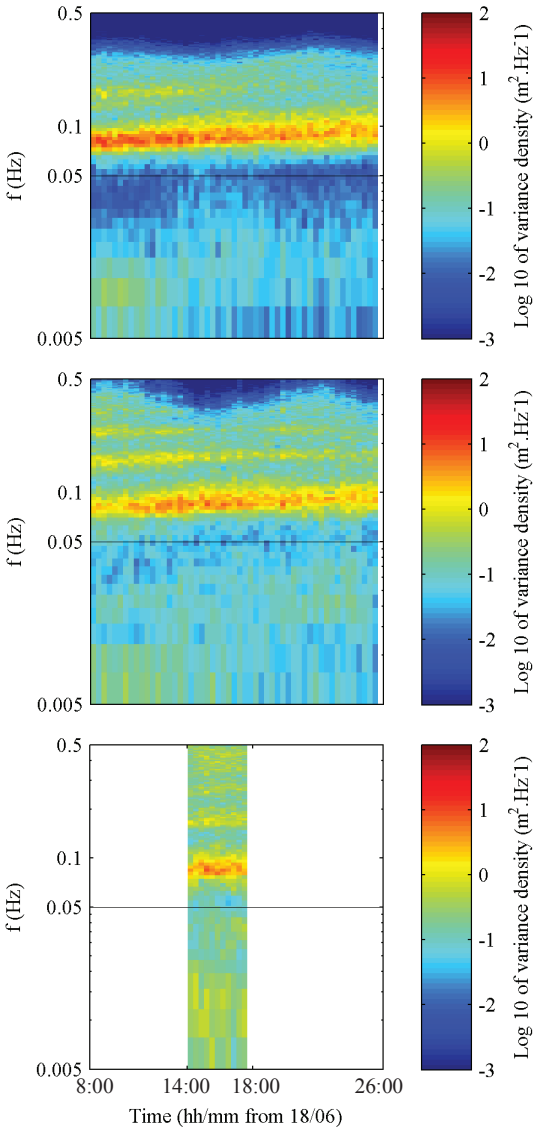


Fig. 2. Time evolution of the log 10 variance spectral density for PT1 (top), PT2 (middle) and ADV (bottom). The horizontal grey line separates the sea-swell from the infragravity frequency band.

A comparison between the infra-gravity significant wave height ($Hm0_{IG}$) and the $Hm0_{SS}$ normalized by the mean water depth (h) is shown in Figure 3 for PT1 (blue crosses), PT2 (red dots) and ADV (black asterisks). Several authors proposed the initiation of dissipation by depth-induced breaking whenever the $Hm0_{SS}$/h ratio is higher than 0.33 (Van Enckevort

and Reincke, 1996). $Hm0_{IG}$ was higher at ADV (up to 0.42 m) and for higher values of the normalized $Hm0_{SS}$.

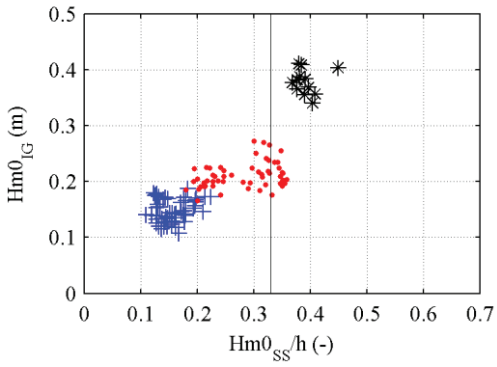


Fig. 3. Dispersion diagram between the infra-gravity wave height and the sea-swell wave height normalized by the mean water depth for PT1 (crosses), PT2 (dots) and ADV(asterisks).

Estimates of the β parameter (Figure 4) were within the limits of the generation of both mechanisms (0.06 for bound wave mechanism and 0.3 for the breakpoint mechanism). These estimates were higher for ADV (0.18) when compared to both PTs (0.13). Also, they were tide-independent.

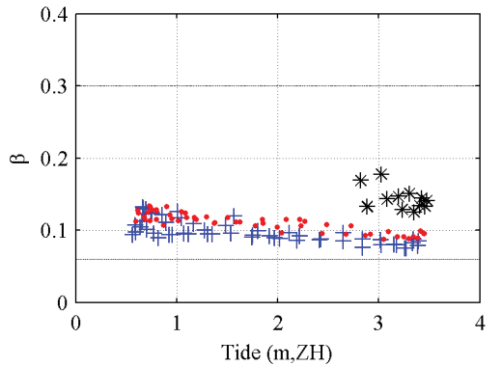


Fig. 4. β parameter dependence on the tidal level for PT1 (crosses), PT2 (dots) and ADV(asterisks).

Estimates of the surf beat similarity parameter were also higher for ADV (Figure 5). These values reached up to 0.027 when compared to PTs maximum value of 0.018. They were not tide dependent as the β estimates.

5. DISCUSSION

The higher levels of SS energy for PT1 when compared to PT2 and ADV indicate that dissipation is occurring either from depth-induced breaking or bottom friction. The development of super-harmonics was compatible with such depths. These super-harmonics were tide-dependent which means that PT2 is located in the surf zone. The increase in the IG energy band close to the shoreline is an evidence of the importance of IG waves near the coastline.

Figure 3 shows that PT2 is actually at the surf zone when the normalized $Hm0_{SS}$ was higher than 0.33. However, $Hm0_{IG}$ was higher at ADV which may suggest a transition between the two generation mechanisms and also the shoaling of released bound IG waves during breaking towards the shoreline.

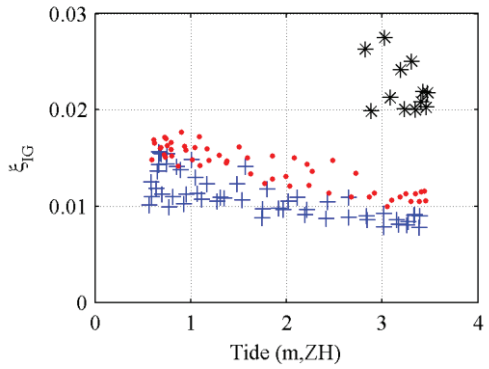


Fig. 5. Surf beat similarity parameter dependence on the tidal level for PT1 (crosses), PT2 (dots) and ADV(asterisks).

The estimates of β and the surf beat similarity parameter indicated that IG waves were generated by the SS wave groups. The values of β close to 0.06 for both PTs and the low values of surf beat similarity parameter are clear evidences that the bound wave mechanism is the source of IG waves at S. Jacinto beach. Also, at the ADV location a contribution of the breakpoint mechanism can be seen to some extent. This contribution was more pronounced close to the shoreline which agrees well with the breakpoint generation theory.

6. CONCLUSIONS

IG wave motions were analysed at S. Jacinto beach based on field observations. $Hm0_{IG}$ was higher close to the shoreline and this growth can have an effect on the near-shore circulation and morphodynamics.

Close to the shoreline and at high-tide, the generation mechanism of IG wave motions at S. Jacinto beach was mainly due to the bound wave approach. The breakpoint mechanism has also a role. Further numerical modelling should be performed to quantify the contribution of each mechanism.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge all the participants in the field campaign. This research is a contribution to project RAIA.CO (0520_RAIA_CO_1_E), Observatório Marinho da Margem Ibérica e Litoral, funded by the European Fund for Regional Development (EFDR) through the Programa Operacional de Cooperação Transfonteiriça Espanha-Portugal (POCTEC). The first author acknowledges a PhD fellowship granted by Fundação para a Ciência e Tecnologia, (FCT), the Portuguese funding agency (grant PD/BD/114463/2016).

REFERENCES

Baldock, T. E. (2012). Dissipation of incident forced long waves in the surf zone - Implications for the

concept of “bound” wave release at short wave breaking. *Coastal Engineering*, 60, 276-285.

Battjes, J. A., Bakkenes, H. J., Janssen, T. T., & Van Dongeren, A. R. (2004). Shoaling of subharmonic gravity waves. *Journal of Geophysical Research*, 109, C02009.

De Bakker, A. T. M., Tissier, M. F. S., & Ruessink, B. G. (2014). Shoreline dissipation of infragravity waves. *Continental Shelf Research*, 72, 73-82.

Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. W. (1962). Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to ‘surf beats’. *Journal of Fluid Mechanics*, 13(04), 481-504.

Mendes, D., Pinto, J. P. and Jorge da Silva, A. (2015). Application of an operational model to forecast near-shore circulation: the case study of S. Jacinto beach. *Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia (CNCG15) – Ordem dos Engenheiros*. Academia Militar, 29 e 30 de Outubro 2015, Lisboa.

Schäffer, H. A. (1993). Infragravity waves induced by short-wave groups. *Journal of Fluid Mechanics*, 247, 551-551.

Symonds, G., Huntley, D. A., & Bowen, A. J. (1982). Two-dimensional surf beat: Long wave generation by a time-varying breakpoint. *Journal of Geophysical Research*, 87(C1), 492-498.

Tucker, M. J., and Pitt, E. G. (2001). *Waves in Ocean Engineering*. Elsevier. 550pp.

Van Enckevort, I., and Reincke, E. (1996). *Longshore currents in the intertidal zone of Terschelling*. M.Sc. Thesis, Utrecht University, The Netherlands, 62 pp.

A first glance at S. Mateus seamount (Azores Islands) The REP15 picture

J. Vitorino (1), I. Martins(1) and M. Marreiros (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas 49, 1249-093 Lisbon (Portugal). joao.vitorino@hidrografico.pt

Abstract: Located just 15 km southwest of the Pico Island, the S. Mateus seamount remains a largely unknown seamount area of the Azores Archipelago. As part of Phase 2 of the Recognized Environmental Picture (REP) 15 exercise, Instituto Hidrografico conducted a program of physical measurements on this seamount between 15 and 19 July 2015, onboard NRP "Almirante Gago Coutinho". In this contribution we describe the ongoing research aiming to combine this data set with numerical models in the characterisation of the dominant physical processes acting on this seamount.

Key words: Seamount dynamics, S. Mateus seamount, N Atlantic Observations, Assimilation models

1. INTRODUCTION

On July 2015 the Recognized Environmental Picture (REP) 15 exercise was conducted jointly by the Portuguese Navy and the Porto University in the waters of the Azores Archipelago. Phase 2 of this exercise was dedicated to the evaluation of the use of autonomous vehicles (AUVs and UAVs) in the characterization of the environmental conditions in the waters surrounding Faial and Pico Islands. The opportunity was taken to address several relevant scientific questions about the marine environment of that area through a close collaboration with the Oceanography and Fisheries Department of University of Azores (DOP).

Between 15 and 19 July 2015 the REP15-Phase2 work was focused on the S. Mateus seamount (figure 1), an elliptic shaped seamount roughly NW-SE orientated, which is located just 15 km southwest of Pico Island and rises from depths of 1700-1800m to about 400m. The S. Mateus seamount is known to be an area of regular assemblages of whales (M. Silva personal communication), which seem to find here favorable conditions. However, contrarily to what occurs with other seamounts in the area (Condor seamount or Princess Alice seamount), it remains largely unknown, particularly in what regards the prevailing physical oceanography conditions.

The main objective of REP15-Phase2 survey on S. Mateus seamount area was to evaluate the use of autonomous vehicles in the tracking of whale communities, involving both operations with AUVs and UAVs as well as whale watching and tagging operations. A second objective of the survey consisted in the observation of the S. Mateus seamount area to characterize the dominant physical processes that take place there. This objective was accomplished by Instituto Hidrográfico (IH). Here we describe how the data set collected during REP15-Phase2 survey is being combined with numerical models to accomplish this goal.

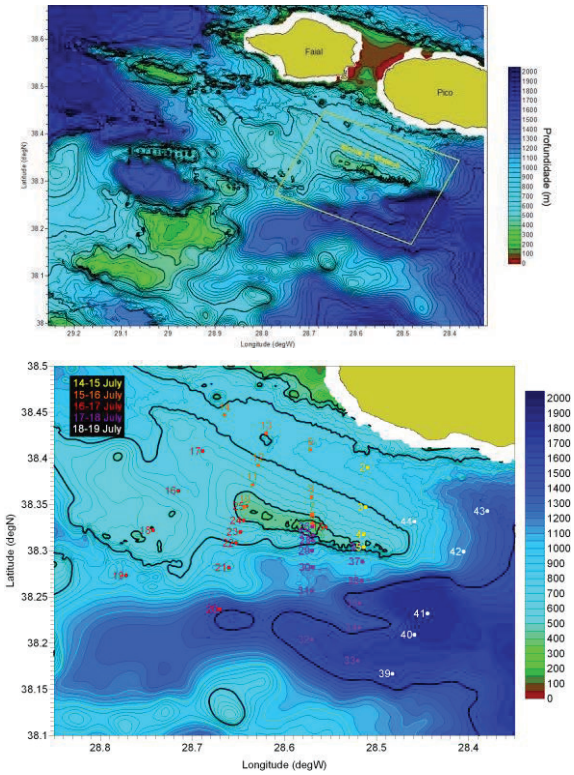


Fig. 1. (Top) Bathymetric map of the area offshore Faial and Pico Islands showing the different seamounts areas. S. Mateus seamount is indicated by the yellow square. (Bottom) Detailed bathymetry of S. Mateus seamount and CTD/LADCP stations covered from 15 to 19 July 2015.

2. DATA AND METHODS

2.1 *Physical measurements in S. Mateus seamount.*

The program of physical measurements conducted from the 15 to the 19 July 2015 in the area of S. Mateus seamount was aimed to build a synoptic picture (a snapshot) of the dominant subinertial physical processes affecting the seamount area. We were then focussing processes that typically evolve on time scales of a few days to a few weeks and that affect the complete area of the seamount and surrounding environment.

The specific observational strategy adopted to accomplish this goal (figure 1) was dictated by the constraints imposed by AUVs and UAVs operations. A total of 43 stations of measurement were occupied during the 5 days of the mission, covering the complete area of S.Mateus seamount. Since the data collected was to be used in a data assimilation model, the domain of observations also corresponded to the numerical model domain.

Surface to near bottom measurements were collected in each station. A Neil Brown MKIIIC CTD probe was used to measure pressure, temperature and conductivity, which combined provided salinity. The probe was also equipped with a Chelsea Acquatracka III nephelometer (measuring the concentration of suspended particle matter, in the range 0-25 FTU), with a Seapoint chlorophyll fluorometer (measuring chlorophyll-a concentration in the range 0-15 µg/l) and with a Benthos altimeter. The CTD was lowered at typical speeds of 1m/s and the data was transmitted in real time to the acquisition system onboard through an electro-mechanical cable, at a sampling rate of 25 Hz. The P, T and C sensors were calibrated at IH calibration laboratories 35 day before the survey, no in-situ calibrations were conducted during the survey. The CTD data was processed using the methodology implemented at IH which follows the international recommendations. In this work data at 1m vertical resolution, filtered from variability with vertical scales lower than 5m, is considered.

A 300 kHz Workhorse RDI Acoustical Doppler Current Profiler (ADCP) was coupled to the CTD frame in a down-looking configuration and used as a lowered (L)ADCP to provide current measurements from surface to bottom in all stations. The LADCP was configured with 20 cells of 5 m, collecting data in ensembles of 1 second with 1 ping per ensemble. The LADCP data was processed with the methodology introduced by Visbeck (2002) using as additional constraints the ship GPS positioning and the ship mounted ADCP (SADCP) data collected.

The RDI Ocean Surveyor 75 kHz ADCP installed in the hull of NRP "Almirante Gago Coutinho" was used - in all CTD stations (during the up cast) and in transit between stations - to measure the current profile in the first 400m of the water column. The ship mounted ADCP (SADCP) operated in broadband mode with 40 cells of 10m. SADCP profiles were processed using the CODAS software from University of Hawaii.

2.2 *Complementary information.*

The characterisation of the meteorological conditions that affected the S. Mateus seamount area during the global period of the REP15-Phase2 survey was based on the ECMWF fields (analysis at 00 and 12 hours, forecasts at 06 and 18 hours each day), provided by the Portuguese Institute of the Sea and Atmosphere (IPMA).

The characterisation of the sea surface temperature field in the North Atlantic area during the same period was based on the Level 4 (gap free gridded) SST maps provided by the Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Centre (FNMOC) of the US Navy in the framework of the Global High Resolution SST (GHRSST) project. GHRSST maps and correspondent error statistics were available with a spatial resolution of 10 km, at 6 hours intervals.

2.3 *Characterization of subinertial processes.*

The final 3D picture that can be built from the REP15-Phase2 observations using exclusively the data does not corresponds to a true synoptic picture. This is so because several days were required to complete the coverage and during this period of time the oceanographic fields were evolving in response to forcing conditions and dynamical processes. In addition, the observations are themselves contaminated by aliasing due to the high frequency processes (e.g. internal tides) which are not resolved by the observational strategy.

In order to overcome these problems and to be able to use the observations to build the best as possible synoptic characterisation of the subinertial processes that affected the area of S. Mateus seamount an additional step is required. This involves the use of a numerical model with data assimilation, in our case the Harvard Ocean Prediction System (HOPS, Lozano et al., 1996) a primitive equation model formulated under the rigid lid approximation which integrates a robust optimal interpolation (OI) assimilation scheme. HOPS was implemented in the area covered by the observations, using a Cartesian grid with 300m resolution in each horizontal direction. View the specific characteristics of the S. Mateus seamount hybrid coordinates were chosen for the vertical discretization. A total of 35 vertical levels were used, with 10 constant depth levels (z-levels) between the surface and 200m depth and 25 σ- (terrain following) levels from 200m to the bottom.

To build the final synoptic picture HOPS was run from 16 July to 24 July 2015 with a time step of 54 seconds, with assimilation of the T and S profiles collected at each CTD station and forced by the ECMWF wind fields. The CTD profiles were assimilated at their own time and allowed to evolve subsequently under the changing forcing conditions and dynamical processes.

The assimilation strategy used in based on an intermittent optimal interpolation scheme. Objectively analysed fields and correspondent errors maps were generated for both initialization and assimilation (at 12:00 each day) using temporal and spatial correlations scales representative of the large

scale and mesoscale fields. For each day a total of 10 assimilation cycles were considered, with the observation weight increasing gradually from 0 to 1 on each day, which allowed a gradual increase of influence of the observations during each day.

Subgrid physics was parameterised in the horizontal with a Shapiro filter applied each time step on the tracers/current fields (order 4) and on the transport stream function field (order 2). In the vertical the Pacanowski & Philander scheme was used. Open boundary conditions were used for tracers, current and transport stream function (Orlansky radiation type) and for vorticity (Spall and Robinson type).

2.4 *Modelling strategy for tidal processes.*

The impact of the dominant tidal currents over S. Mateus seamount was evaluated using the Princeton Ocean Model (POM, Blumberg & Mellor, 1987) an extensively used free-surface primitive equation model. A regional POM configuration was implemented for the area from 37.2ºN to 39.4ºN and from 26.3ºW to 29.8ºW, with a grid resolution of about 1.852 km. This option for the model domain allowed to include the 5 islands that integrate the Azores Central Group (Terceira, Graciosa, S. Jorge Faial and Pico) and to place the model boundaries in areas of relatively smooth topography, avoiding complexities associated with seamounts. The regional POM was run in 2D mode for the period from 01 to 21 July 2015, forced at the open boundaries by imposing the values of sea surface height and current velocities derived from the OTIS global tidal solution (Egbert & Erofeeva, 2002) using with a total of 11 tidal constituents. The evaluation of the regional model solution was conducted using data from tide gauges maintained by IH in islands of the Central Group.

In a second step of the study of tidal processes, a 3D POM model will be implemented for the area of the S. Mateus seamount and used with the forcing from the barotropic model and stratification characteristics obtained from the REP15-Phase2 survey.

3. PRELIMINARY RESULTS

3.1 *The large scale picture.*

The GHRSST fields suggest that in July 2015 the Azores Current/Azores Front system was located somewhat north of its climatological position (32-34ºN, e.g. Alves & Colin de Verdière, 1999).The northern limit of the Azores Front extended over the study area, with a marked thermal gradient affecting the areas offshore Fail-Pico Islands.

The REP15-Phase 2 was conducted under westerly and southwesterly winds, with period of stronger winds (speeds up to 12 m/s) occurring during the last days of the survey.

3.2 *Subinertial processes.*

The HOPS fields obtained for the 20 or 21 July 2016 correspond to the best synoptic characterizations of the subinertial processes acting in the area of S. Mateus seamount that can be built from the CTD data collected during REP15-Phase2. The circulation pattern and associated thermohaline fields on the first 500m of the water column are consistent with the general picture of a warm (and saline) flow that enters in the study area through the SW boundary and interacts with the S. Mateus seamount. This flow transports water with temperature-salinity characteristics close to the ones of the Western North Atlantic Water defined by Iselin (1936) for a section at 30ºW, which reinforces the suggestion of an influence of the Azores Current over the study area in July 2015. At the surface levels (figure 2), however, this picture is disturbed by the presence of a cold and fresh intrusion that enters into the domain through the northern boundary and extends its influence over the seamount area. This intrusion seems to forces the warm flow to be displaced offshore and to follow a broad curved path, entering in the domain along the SE and eastern boundaries. The surface temperature measured in this area match well with the ones depicted in GHRSST fields, but the satellite images used to define the global conditions lack resolution and the cold intrusion is only barely identified in the images.

The REP15-Phase2 survey was conducted under westerly winds and these may have promoted upwelling along the southern coast of Pico Island. These conditions could have, in part, contributed to the presence of cold waters at surface level.

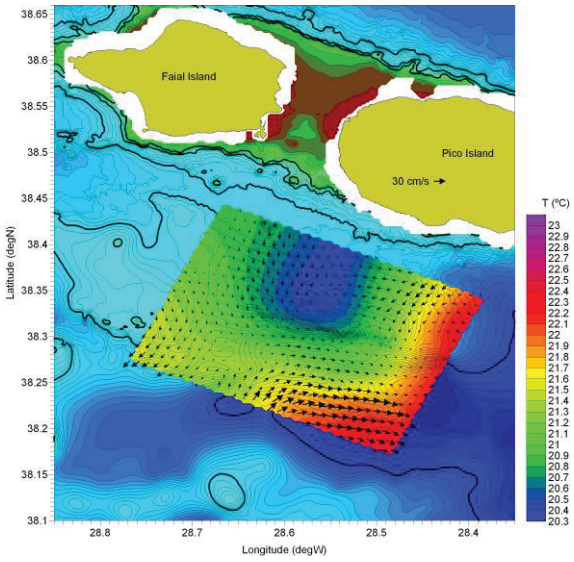


Fig. 2. HOPS surface temperature and current for 00:00 21 July 2015.

However, based on the barotropic tidal model results and additional pieces of information collected during the survey we suggest that the main reason for this cold water intrusion is the outflow of water from the

Pico Channel promoted by the semidiurnal tidal currents.

Below 50-100m the cold intrusion is no longer evident. On approaching the shallow areas of the seamount the warm and saline northeastward flow is deflected, with one branch curving southeastward and exiting the study area along the SE corner, while a second branch is deflected first northwestward and subsequently contributes to a weak anticyclonic (clockwise) circulation around the northern flank of the seamount. Roughly over the top of the seamount a pool of warm and saline water is observed at 200m depth suggesting the occurrence of downwelling of waters from levels above. The overall picture is suggestive of a Taylor cap process over the top of the seamount.

At 1000m waters the HOPS results show that water with Mediterranean Water influence recirculates in the deep channel located south of the seamount and flows northeastward along the SE flank of the seamount. The results suggest the occurrence of upwelling of cold and fresher waters from depths below at the steep flank of the seamount. On the northeastern part of the domain an increase (decrease) in temperature (salinity) at this depth probably reflects an increased mixing of this water with the water above.

The circulation patterns revealed by HOPS with assimilation of the CTD data will be compared with the LADCP and SACP current profiles.

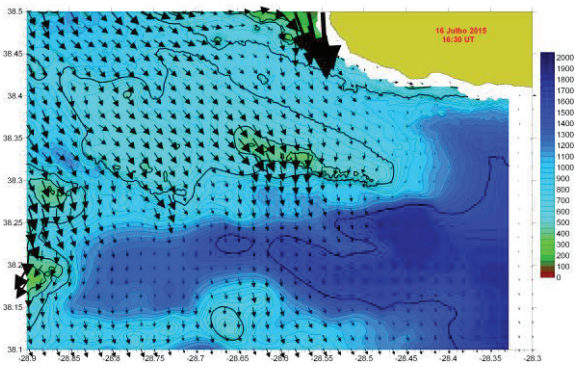


Fig. 3. Barotropic tidal current in the area of S.Mateus seamount on the 16 July 2015 during ebb tide

3.3 *Tidal processes.*

The results from the regional barotropic tidal model suggest that the S. Mateus seamount can be under different forcing conditions during the dominant semidiurnal tidal cycle. During flood tide the water tends to flows towards NNE or N along the Pico Channel, with a tendency for the tidal current profile to be symmetric in the channel and maximum tidal currents (reaching 60-70 cm/s) to occur at the center of the channel. During ebb tide the tidal current runs towards SSW, with a tendency for higher currents to be more displaced towards Pico Island. The S. Mateus seamount seems to be less affected by barotropic tidal currents during flood tide, with weak current flowing over the seamount from the deep channel offshore. During ebb tide the seamount is more extensively affected by the barotropic tidal current flowing from the shallower areas near the islands and current intensification is found over the top of seamount (figure 3).

Acknowledgements

Thanks are due to the coordination team of REP15-Phase2, LtCdr Madaleno Galocha (Portuguese Navy) and João Tasso and Kanna Rajan (FEUP-Engineering Faculty of Porto University), and also to Monica Silva (DOP), for the successful collaboration established. Important pieces of information were made available by Leonor Veiga (bathymetric data), Fernando Vasquez (tide gauge data) and Ilmer Golde (ECWF fields) who we want to thank. The intensive program of observations conducted during REP15-Phase2 was only possible by the extraordinary commitment of the crew of NRP "Almirante Gago Coutinho", under the command of Cdr Marques Peiriço.

REFERENCES

Alves, M.L.G. & Colin de Verdière A. (1999). Instability dynamics of a subtropical jet and applications to the Azores Front Current system: eddy.driven mean flow. *Journal of Physical Oceanography*, 29, 837-864.

Blumberg, A.F. & Mellor G.L. (1987). A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in N.Heaps (Ed.), *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*,. American Geophysical Union, Washington, D.C., 4, 1-16.

Egbert G. D. & Erofeeva S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Oceanic and Atmospheric Technology*, 19, 183-204

Iselin, C.O'D. (1936). A study of the circulation of the western North Atlantic. Papers in Physical Ocenography and Meteorology, 4, nº4, 101pp.

Lozano, C.J., Robinson, A.R., Arango, H.G., Gangopadhyay, A., Sloan, A., Haley, P.J., Anderson, L. & Leslie, W. (1996). Na interdisciplinary ocean prediction system: assimilation strategies and structured data models. In P. Malanotte-Rizzoli (Ed.). *Modern Approaches to Data Assimilation in Ocean Modelling*, Elsevier Science B.V., 413-452.

Visbeck, M. (2002). Deep velocity profiling using lowered Acoustic Doppler Current Profilers: Bottom track and inverse solutions. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19, 794-807.

Circulação costeira no barlavento Algarvio no verão e outono de 2015

P.B. Oliveira (1), M. Santos (1,2), T.Moita (1,3) and A. Amorim (2)

(1) IPMA - Av. Alfredo Magalhães Ramalho, 1495-165 Lisboa. pboliveira@ipma.pt

(2) MARE/FCUL - Campo Grande, 1749-016 Lisboa

(3) CCMAR - Univ. Algarve, Campus de Gambelas, 8000-139 Faro

Resumo: Estudos anteriores mostram que a circulação costeira na costa algarvia se caracteriza por uma elevada variabilidade temporal. Neste trabalho são apresentados os resultados da medição da corrente com um ADCP fundeado a cerca de 1 milha ao largo da Ponta da Piedade, à profundidade de 30 m, entre Julho e Novembro de 2015. Os dados mostram a predominância da corrente dirigida ao longo da costa, sendo tipicamente dirigida para leste durante os períodos de vento dos quadrantes norte/oeste e em sentido contrário em períodos de vento fraco, de sul ou de levante. A comparação com soluções publicamente disponíveis de diferentes modelos numéricos revela disparidades entre os modelos e as observações. A análise centrada nos eventos de corrente com intensidades superiores a 0.1 m/s, e com duração superior a um dia, mostra diferenças importantes entre as soluções dos vários modelos no que respeita à intensidade, duração e estrutura vertical das correntes.

Palavras-chave: Circulação costeira, afloramento, upwelling, levante, ADCP, modelos numéricos.

1. INTRODUÇÃO

Um dos aspectos mais distintivos da oceanografia costeira do barlavento Algarvio, durante o verão, é a ocorrência de um forte gradiente da temperatura da superfície do mar (TSM), que separa a água fria resultante do afloramento junto ao cabo de S. Vicente e a água mais quente situada a leste e ao largo. A baía de Lagos surge neste contexto como uma região costeira onde a TSM é relativamente elevada, sujeita a episódios de arrefecimento associados ao aumento da área abrangida pelas águas mais frias que se estendem para leste a partir do Cabo de S. Vicente (Relvas et al., 2007).

O registo de valores elevados da concentração de fitoplâncton tóxico de origem tropical e sub-tropical, da espécie *Ostreopsis cf. ovata*, na praia de D. Ana em 2011 (David et al, 2012) vieram colocar a hipótese da expansão para norte da área ocupada por aquela espécie, observada tipicamente a latitudes menos elevadas. Por seu turno, a constatação de que as maiores concentrações se observaram na parte oeste da baía de Lagos indicam que as condições aí observadas deverão ser particularmente favoráveis à sua proliferação.

Neste trabalho são apresentados os resultados das observações realizadas junto à Ponta da Piedade durante o verão de 2015, com o objectivo de caracterizar a estrutura vertical e a variabilidade temporal da corrente costeira, assim como validar as soluções dos modelos numéricos publicamente disponíveis para o barlavento Algarvio.

2. DADOS

As observações do perfil da corrente entre os 11.5 e os 26.5 m de profundidade foram efectuadas com um correntómetro acústico ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) RDI/Teledyne WH Sentinel 1200 kHz, fundeado junto à bóia de sinalização da aquacultura "Algarve *Offshore Seashells*" da empresa Testa e Cunhas, situada a 0.9 milhas da Ponta da Piedade sobre a isóbata dos 30 m (Fig.1). O equipamento foi configurado para a medição do perfil de correntes com uma resolução vertical ("Depth cell size") de 3 m e uma taxa de amostragem de 10 min, sendo cada amostra (ensemble) calculada a partir de 120 pulsos ("water pings"), o que resulta num desvio padrão estimado de 0.15 cm/s. O equipamento foi fundeado no dia 30 de junho de 2015 e recuperado no dia 19 de novembro de 2015, correspondendo a uma série temporal de 142 dias de perfis de corrente. Para análise da variabilidade sub-inercial foi aplicado um filtro "passa-baixas" com um período de corte de 40 horas sobre os valores médios horários, utilizando a função "lsl_lowpass" do programa Ferret (Hanking et al., 1996).

Para o estudo dos padrões da temperatura da superfície do mar (TSM) utilizaram-se as imagens diárias da análise MUR - *Multiscale Ultrahigh Resolution* - (MUR, 2016), versão 4.1, disponíveis no arquivo PODAAC (*Physical Oceanography Distributed Active Archive Center*) do *Jet Propulsion Laboratory* da NASA.



Fig. 1. Localização do ADCP a 0.9 milhas da Ponta da Piedade, fundeado sobre a isóbata dos 30 m.

As soluções dos modelos numéricos utilizadas foram obtidas a partir do serviço europeu CMEMS (*Copernicus Marine Environment Monitoring Service*) e dos grupos nacionais de modelação da circulação oceânica que disponibilizam os resultados numéricos dos seus modelos de forma operacional na internet: o Grupo de Modelação Oceânica – GMO do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e CESAM (Centro de Estudos do Ambiente e do Mar), e o Centro de Ambiente e Tecnologia Marinha - MARETEC do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. O serviço CMEMS disponibiliza soluções diárias do modelo NEMO com uma resolução horizontal de 1/36º (~2.5km) e uma resolução vertical variável em profundidade, com 15 níveis até aos 30 m. O GMO disponibiliza soluções do modelo ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) com uma resolução temporal de 12 horas, uma resolução horizontal de cerca de 3 km e cinco níveis verticais: 1, 10, 50, 100 e 1000 m. As soluções produzidas pelo MARETEC baseiam-se no modelo MOHID e são disponibilizadas com uma resolução temporal de 3 horas, com uma espaçamento horizontal de cerca de 5 km e uma resolução vertical semelhante ao modelo NEMO, com 15 níveis até aos 30 m.

Para análise do forçamento atmosférico utilizaram-se os dados de vento aos 10m das reanálises "ERA-interim" do Centro Europeu de previsão a médio prazo (ERA - ECMWF - *European Centre for Medium-range Weather Forecasts* - *ReAnalysis*). As reanálises ERA-interim são disponibilizadas publicamente com uma resolução espacial de 25 km e temporal de 6 horas. A tensão do vento foi calculada a partir do vento aos 10m utilizando a parametrização em bloco descrita por Schwing et al. (1996).

3. RESULTADOS

As observações efectuadas com o ADCP mostram que a circulação costeira sub-inercial nas proximidades da Ponta da Piedade (Fig. 2) é dominada pela componente ao longo da batimetria, orientada na direcção E-W. No que respeita à variação temporal, o regime das correntes tem um carácter intermitente, com episódios de corrente superior a 0.1 m/s com durações tipicamente de 2-3 dias, sendo frequente a inversão rápida (< 12h) no sentido da corrente, passando de valores elevados (> 0.1 m/s) num sentido para valores igualmente elevados no sentido contrário (*e.g.* 13 setembro). Para além da diferença de intensidade, a distribuição vertical das componentes longitudinal e transversal à costa também possuem características distintas, observando-se um claro padrão de maior homogeneidade da componente longitudinal com uma intensificação nos níveis superiores, em contraste com heterogeneidade da componente transversal onde se registam alguns episódios de valores mais elevados junto ao fundo (*e.g.* 4 e 14 setembro, 6 outubro, 7 novembro), sendo dirigidos para o largo e associados aos máximos de intensidade de corrente para leste. Focando a análise nos episódios de corrente superior a 0.1 m/s e duração superior a 2 dias, verifica-se que entre o início de julho e meados de novembro ocorreram 7 episódios de levante (corrente para Oeste) e 7 episódios de corrente para leste. Os eventos de levante foram geralmente mais prolongados, com um máximo de 5 dias registado entre os dias 17 e 21 de outubro. Relativamente à distribuição vertical, verifica-se uma assimetria entre os dois tipos de evento, sendo que nos períodos de corrente para leste o perfil vertical é mais homogéneo, com correntes elevadas junto ao fundo. Durante os eventos de levante as correntes mais intensas estão geralmente confinadas aos primeiros 20 m de profundidade, com excepção do episódio particularmente intenso de meados de outubro em que a componente sub-inercial junto ao fundo atingiu valores superiores a 0.15 m/s no dia 20.

Dada a curta duração dos episódios, a inversão do sentido da corrente não corresponde necessariamente a alterações significativas na distribuição da TSM no barlavento Algarvio. Por exemplo, distribuição da TSM para os dias 31 de julho e 29 de setembro, que correspondem respectivamente a episódios de corrente para leste e de levante, apresentam padrões semelhantes (Fig. 3), tanto nas análises MUR, baseadas em dados de satélite (à esquerda), como nas soluções do modelo CMEMS/NEMO (à direita). Nas duas situações a distribuição da TSM é semelhante, sendo dominada pelo núcleo de água fria que estende para leste a partir do Cabo de S. Vicente até à baía de Lagos. Todavia, os padrões da corrente aos 10 m do modelo CMEMS/NEMO (vectores sobrepostos na TSM do modelo, à direita) são totalmente distintos.

Tendo em vista a utilização dos modelos numéricos para o estudo do transporte de plâncton importa validar as soluções dos modelos relativamente à intensidade das compontentes da corrente. Na Fig. 4 apresentam-se as séries temporais de vento e corrente aos 15 m, observadas com o ADCP e extraída dos modelos numéricos disponíveis. Os valores estatísticos para a o desvio médio (bias) e a

raíz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), entre os modelos as observações, são apresentados na Tabela I.

Tabela I. Parâmetros estatísticos de comparação entre as componentes da velocidade da corrente calculada pelos modelos de circulação e as velocidades medidas com o ADCP aos 15 m, entre 1 julho 2015 e 18 novembro de 2015 ao largo da Ponta da Piedade.

Modelo	U (m/s)		V (m/s)	
	Bias	RMSE	Bias	RMSE
CMEMS NEMO	-0.06	0.12	-0.01	0.04
MARETEC MOHID	-0.02	0.09	0.01	0.02
GMO ROMS	-0.05	0.12	0.00	0.02

4. CONCLUSÃO

As observações efectuadas mostraram uma elevada variabilidade temporal das correntes costeiras junto à Ponta da Piedade, alternando entre episódios de corrente para leste e de sentido contrário (levante). Este padrão foi também observado por Garel et al. (2016) que analisaram cerca de 18 meses de observações horárias realizadas com um ADCP fundeado a 23 m de profundidade a leste do Cabo de Santa Maria, no sotavento algarvio.

A comparação entre os dados do ADCP e os modelos numéricos mostrou uma diferença significativa entre as soluções dos modelos e as observações. Os resultados mostram a necessidade de utilizar configurações dos modelos numéricos que permitam resolver os processos da zona costeira, caracterizada por uma elevada variabilidade espacial e temporal. Neste contexto, a costa sul de Portugal continental, e em particular o barlavento algarvio, apresenta-se como uma região complexa, sendo necessário utilizar elevadas resoluções espaciais para resolver particularidades da circulação resultante do afloramento costeiro no Cabo de S. Vicente, durante o regime de nortada, e a circulação associada aos ventos de levante (Teles-Machado et al., 2007) e aos gradientes de pressão ao longo da costa (Garel et al., 2016). Atendendo aos estudos recentes que mostram que alguns processos atmosféricos na zona costeira só são adequadamente representados em modelos meteorológicos de alta resolução (< 10 km) (Monteiro et al., 2016), e que esses processos são relevantes para circulação oceânica (Renault et al., 2012), o requisito para a utilização de elevadas resoluções espaciais estende-se aos modelos atmosféricos utilizados para forçar os modelos da circulação oceânica.

Agradecimentos

Este trabalho realizou-se no âmbito da bolsa de doutoramento de Mariana Santos do programa doutoral "EarthSystems" (FCT) intitulado "*Harmful Algal Blooms* (HABs) *in a changing world: the case of S and W Iberian Bays*".

À empresa Testa e Cunhas (http://testacunhas.com/), em particular ao Eng. A.M. Cunha por toda a colaboração prestada, em particular o apoio logístico para os trabalhos de mar de colocação e levantamento do ADCP. Ao André Ferreira pelo apoio nas operações de mergulho para fundeamento e recuperação do ADCP.

Os dados CMEMS foram obtidos a partir de http://marine.copernicus.eu. Os dados ECWMF ERA Interim a partir de http://www.ecmwf.int/, e os dados MUR SST do arquivo PO.DAAC do JPL https://podaac.jpl.nasa.gov/, http://mur.jpl.nasa.gov.

As soluções dos modelos numéricos desenvolvidos pelo Grupo de Modelação Oceânica da Universidade de Aveiro e MARETEC/IST foram obtidas, respectivamente, dos servidores threeds disponíveis a partir de http://gmo.web.ua.pt/ e http://forecast.maretec.org/maps/. A análise de dados e figuras foram realizadas utilizando o programa Ferret, um produto do PMEL - Pacific Marine Environmental Laboratory da NOAA, disponível em http://ferret.pmel.noaa. gov/Ferret/.

REFERÊNCIAS

David H., A. Laza-Martínez, E. Orive, A. Silva, M.T. Moita, M. Mateus & H. de Pablo (2012). First bloom of Ostreopsis cf. ovata in the continental Portuguese coast. IOC-UNESCO/Harmful Algae News, nº45.

Garel, E.; Laiz, I.; Drago, T. e Relvas, P. (2016). Characterisation of coastal counter-currents on the inner shelf of the Gulf of Cadiz Journal of Marine Systems, 155, 19-34.

Hankin, S., Harrison, D.E., Osborne, J., Davison, J. e O'Brien, K., (1996). A Strategy and a Tool, Ferret, for Closely Integrated Visualization and Analysis. The Journal of Visualization and Computer Animation 7, 149-157.

Monteiro, I. T., A. J. Santos, M. Belo-Pereira e P. B. Oliveira (2016). Adjustment of the summertime marine atmospheric boundary layer to the western Iberia coastal morphology, J. Geophys. Res. Atmos., 120, doi:10.1002/2016JD025055.

Relvas, P.; Barton, E.; Dubert, J.; Oliveira, P. B.; Peliz, A.; da Silva, J. e Santos, A. M. P., 2007. Physical oceanography of the western Iberia ecosystem: Latest views and challenges Progress in Oceanography, 74, 149 – 173.

Renault, L., Dewitte, B., Marchesiello, P., Illig, S., Echevin, V., Cambon, G., Ramos, M., Astudillo, O., Minnis, P., Ayers, J. K., 2012. Upwelling response to atmospheric coastal jets off central Chile: A modeling study of the october 2000 event. J. Geophys. Res. 117 (C2), C02030–, doi: 744 10.1029/2011JC007446.

Schwing, F. B., M. O'Farrell, J. M. Steger, and K. Baltz (1996), Coastal upwelling indices, West Coast of North America, 1946 – 1995, NOAA Tech. Memo. NOAA-TM-NMFS-SWFSC-231, 144 p.

Teles-Machado, A.; Peliz, Á.; Dubert, J. e Sánchez, R. F. (2007). On the onset of the Gulf of Cadiz Coastal Countercurrent Geophys. Res. Lett., AGU, 34, L12601.

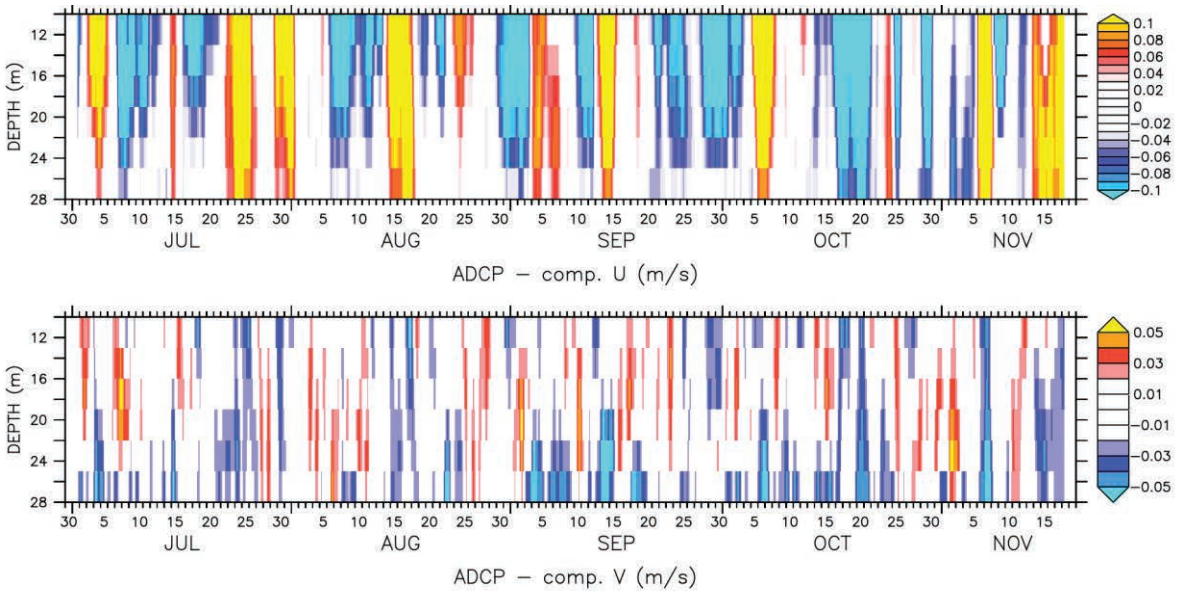


Fig. 2. Série temporal das componentes da corrente sub-inercial observada com o ADCP. Os limites da escala de cor foram seleccionados por forma a evidenciar os eventos de corrente mais elevada e as flutuações no sentido da corrente. As cores quentes representam valores positivos (corrente para leste na componente U e corrente para norte na componente V) e as cores frias representam valores negativos. Note-se que para a componente U (em cima) os limites da escala de cor são o dobro dos limites para a componente V (em baixo).

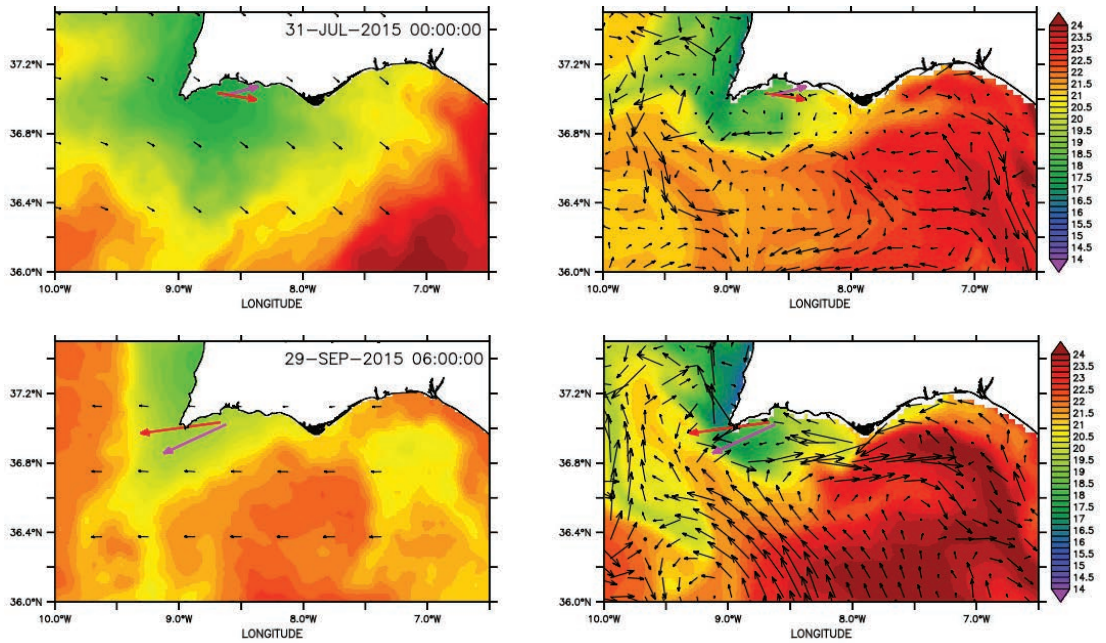


Fig. 3. Mapas da TSM para os dias 31 de Julho (em cima) e 29 de Setembro de 2015 (em baixo), relativos a episódios de corrente intensa para leste e para oeste, respectivamente. À esquerda está representada a distribuição da TSM resultante da análise MUR e os ventos ECMWF/ERA interim, e à direita a temperatura e corrente de superfície do modelo CMEMS/NEMO. Os vectores a cor representam a corrente observada com o ADCP aos 15m (a vermelho) e a solução do modelo CMEMS/NEMO correspondente (a purpura).

Previsão do *runup* no sector poço da cruz – praia de Mira

L. Tubarão (1), P.A. Silva (2), P.R. Baptista (2), T. Luna (2), A. Rocha (2), I. Giannoukakou-Leontsini (1)

(1) Departamento de Física, Universidade de Aveiro. lauratubarao@ua.pt.

(2) CESAM & Universidade de Aveiro.

Resumo: A presente comunicação pretende estabelecer os fundamentos para um sistema de previsão do *runup* a implementar na zona litoral de Aveiro (troço entre o Poço da Cruz e a Praia de Mira). Este modelo recorre à modelação numérica e a formulações empíricas de *runup* e tem como parâmetros de base: a previsão da agitação marítima simulada pelo sistema WAVEWACTH III que se encontra operacional no CliM@UA, a maré astronómica, e a topografia da praia. As formulações empíricas do *runup* foram validadas para o local mediante a comparação com medições efetuadas em campo. Com base nos parâmetros descritos é possível proceder à estimativa do *runup* no horizonte temporal de previsão das condições de agitação marítima (3 dias) e avaliar a probabilidade de ocorrência de galgamentos e/ou rompimento do cordão dunar.

Palavras-chave: *Runup*, previsão, agitação marítima, morfologia de praia.

1. INTRODUÇÃO

A área de estudo localiza-se no litoral de Aveiro a cerca de 20 km a sul da Barra de Aveiro, entre o esporão do Poço da Cruz e a Praia de Mira (Fig.1).



Fig. 1. Localização da área de estudo (Google Maps) e localização do perfil na campanha de campo no dia 6/4/2016 (a vermelho).

Este sector apresenta uma extensão de areal significativa, sendo limitada a Este pelo cordão dunar frontal. Junto ao aglomerado urbano na Praia de Mira, o cordão dunar e a vegetação são quase inexistentes, devido a atividade antropogénica.

A faixa litoral a sul de Aveiro tem vindo a ser afetada pela erosão costeira, o que leva a que seja necessário recorrer a intervenções nessas zonas. Nomeadamente, a sul do esporão do Poço da Cruz, foi contruído recentemente um dique artificial com uma extensão de cerca de 500 m que substitui a duna natural erodida após a construção do esporão.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA PARA O CÁLCULO DO *RUNUP*

O sistema para o cálculo do *runup* (*R*) consiste num conjunto de formulações empíricas que determina os valores de *R* em função de diversos parâmetros da agitação marítima (altura significativa da onda e período da onda), do nível do mar (a maré) e da topografia da praia, conforme representado na Figura 2.

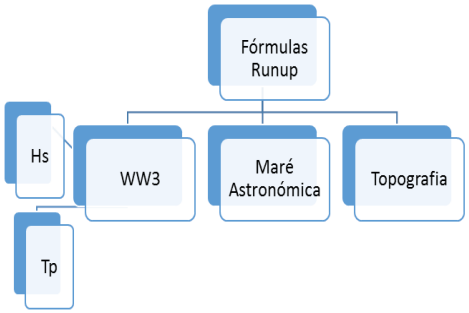


Fig. 2. Fluxograma explicativo do funcionamento do modelo.

2.1. WW3 - Wave Watch III

O modelo numérico Wave Watch III, WW3, foi configurado com dois domínios aninhados, um do oceano Atlântico Norte (D1) e outro confinado à costa de Portugal continental (D2). As resoluções horizontais dos domínios D1 e D2 são 0.5° e 0.05°, respetivamente. O forçamento atmosférico utilizado é proveniente dos modelos meteorológicos Global Forecasting System (GFS) para o domínio D1 e Weather Research and Forecasting (WRF) para o domínio D2. O modelo elabora uma previsão diária (00UTC) para um horizonte temporal de 3 dias. (Fonte: CliM@UA)

Do modelo WW3 são retirados os dados do período de pico (Tp) e a altura significativa da onda (Hs) em intervalos de 1 hora referentes a um ponto ao largo da zona de estudo e localizado no bordo da plataforma (40°30'0"N, 9°27'0"W).

2.2. Maré astronómica

Os dados da elevação da maré são calculados através dos constituintes harmónicos conhecidos para a embocadura da Ria de Aveiro. Estes valores são corrigidos no tempo tendo em conta o avanço da maré na praia de Mira (cerca de 12 min). A amplitude de maré é representativa para o local em estudo e a fase é corrigida através da comparação do sinal medido nos transdutores de pressão instalados no local.

A sobrelevação meteorológica influencia o nível médio da água do mar, sendo que corresponde a uma diferença entre o nível da maré observado e a maré astronómica. Quando se encontra associado a períodos de preia-mar e marés vivas, o nível do mar vai ser superior do que em condições normais.

2.3 Topografia

Os levantamentos topográficos da praia emersa são obtidos com recurso a um GPS diferencial (DGPS) com o sistema INSHORE (Baptista *et al.*, 2011). A recolha de dados foi realizada quando a maré se encontrava em período de baixa-mar, para obter uma maior extensão da praia emersa, que se estende desde a base da duna ao nível do espraio das ondas.

2.4 Formulações empíricas para o cálculo do Runup

Foram selecionadas um conjunto de oito formulações empíricas existentes na literatura: Hunt (1959), Battjes (1971), Holman (1986), Holman e Sallenger (1985), Nielsen e Hanslow (1991), Masselink e Hughes (2003), Stockdon *et al.* (2006), Teixeira (2009), Raubenheimer e Guza (1996).

As diferentes formulações foram estabelecidas para diferentes praias, caracterizadas em termos do número de Iribarren conforme descrito em Silva *et al.* (2014) e nos artigos originais.

3. VALIDAÇÃO DAS FORMULAÇÕES DO *RUNUP*

Tubarão (2013) procedeu ao estudo e validação das formulações empíricas do *runup* referidas anteriormente. No presente trabalho efetuou-se o mesmo estudo, mas considerando os dados da campanha realizada no dia 6 de abril de 2016 e da agitação marítima do WW3 para uma previsão de um dia. Nessa campanha foram efetuadas medições das distâncias de espraio das ondas com o recurso de uma câmara de vídeo, posicionada no cimo da duna. As gravações realizadas na campanha tiveram uma duração de 20 minutos, espaçadas de 1 hora, tendo inicio às 11h e término às 18h. Foi também efetuado o levantamento topográfico no perfil em estudo. Na Figura 3, encontra-se representado o perfil topográfico desde a linha de água até ao topo do cordão dunar e ainda os valores mínimos e máximos da elevação da maré. A análise das imagens vídeo foi efetuada através de um código MATLAB, de forma a obter a distância máxima para cada onda observada no período de estudo.

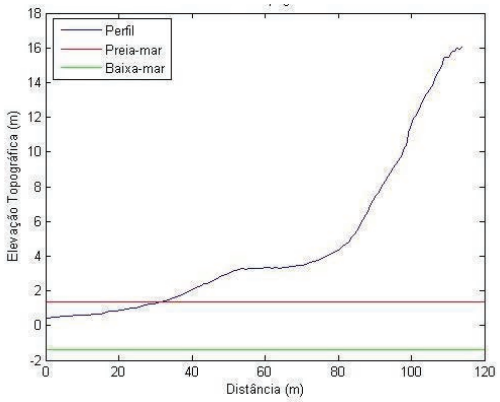


Fig. 3. Perfil topográfico no local das medições do espraio das ondas no dia 6 de Abril 2016. As linhas horizontais indicam os níveis de preia e baixa mar da maré astronómica.

Com os dados do espraio das ondas obtidos através da análise das imagens, representou-se na figura 4 as distâncias máximas de espraio das ondas (d_{max}) em baixa-mar (12h) e em preia-mar (15h). Verifica-se que em preia-mar as distâncias que as ondas percorrem são muito maiores do que em baixa-mar, mas o desvio padrão dos valores é menor no segundo caso. Isto deve-se ao declive da praia se modificar neste período de tempo. A partir da distribuição dos valores de d_{max} foi calculado o percentil 98 e partir deste valor o valor de R2%, tendo em conta o declive da praia.

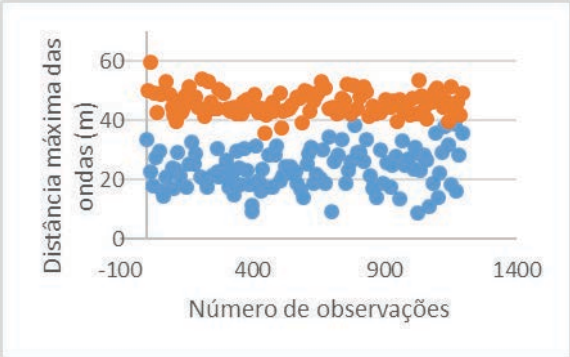


Fig. 4. Distância máxima das ondas em baixa-mar e preia-mar, a azul encontram-se os dados respetivos à baixa-mar (12h) e a laranja à preia-mar (15h).

A Figura 5 compara os valores estimados do R2% com o valor experimental às 15h (às 12h, o nível da maré é inferior à menor cota do perfil topográfico pelo que não foi efetuado esse cálculo). No cálculo considerou-se o declive da praia correspondente à zona de espraio relativa ao intervalo de tempo 15h-15h20. Devido à topografia da praia (Fig. 3) esse valor é superior ao declive da praia calculado no ponto do nível da preia-mar. Verifica-se que os valores estimados enquadram o valor experimental.

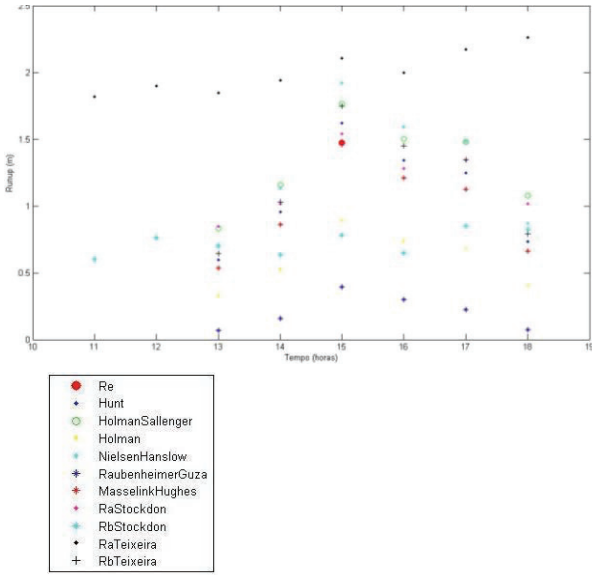


Fig. 5. Comparação entre as estimativas e o valor experimental (Re) de R2%: os valores foram estimados entre as 11 e as 18h de 6 de Abril 2016; o valor experimental é relativo às 15h.

4. ESTIMATIVA DO *RUNUP* NO INVERNO MARITIMO 2013/2014

Procedeu-se ao estudo do *runup* para o caso dos eventos de temporal ocorridos no inverno marítimo de 2013-2014, entre 1 de novembro de 2013 e 31 de março de 2014. A elevação correspondente à base da duna é de aproximadamente de 5 metros, valor esse que vai ser usado posteriormente para a observação de ocorrência de ataque ao cordão dunar.

Considerou-se nesta análise os dados de agitação fornecidos pelo WW3 com os dados da maré astronómica, com dois perfis topográficos, um de novembro de 2013 e outro de abril 2014.

As formulações consideradas para o sistema do *runup* para esta parte do trabalho foram: Hunt (1971) e Battjes (1986), Holman e Sallenger (2006), Stockdon *et al.* (2006) e Teixeira (2009). Estas formulações foram as que melhor se adequavam as caraterísticas de praia e dos parâmetros em estudo pelo sistema do *runup.*

Na Figura 6 encontram-se representadas os níveis máximos de espraio (*N*) atingidos pela água considerando as estimativas de R2% e do nível da maré astronómica para o perfil de abril de 2014.

No período de estudo, verificou-se a ocorrência de tempestades, que corresponderam a HERCULES – 6 janeiro de 2014, BRIGID – 1 fevereiro 2014, e a STEPHANIE – 8 fevereiro 2014. Esses eventos de tempestade conduziram a níveis máximos de espraio que excedem a cota da base da duna.

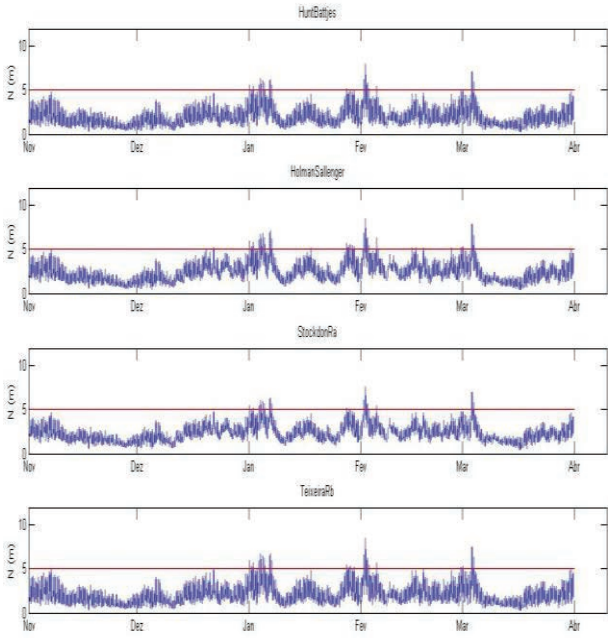


Fig. 6. Representação temporal dos níveis máximos de espraio (N) considerando o perfil topográfico de abril de 2014.

No dia 28 de fevereiro de 2014, observou-se que depois dos eventos de temporais ocorridos nesse Inverno marítimo, acabou por haver formação de escarpas talhadas nas dunas e até mesmo erosão na crista duna, criando corredores eólicos (Figura 7).



Fig. 7. Escarpa talhada na duna em 28 de fevereiro de 2014.

5. CONCLUSÃO

Foi proposto um sistema para a previsão do *runup* com base em diferentes formulações empíricas existentes na literatura e que tem como parâmetros de entrada a agitação marítima ao largo resultantes da estimativa feitas pelo modelo WW3, a maré astronómica e os perfis topográficos.

A aplicação deste sistema no Inverno marítimo de 2013-2014, mostrou que os valores do *runup* excederam os valores da cota da base da duna para os temporais que ocorreram nesse período, o que prevê que haja um recuo do sistema dunar. Esta estimativa está de acordo com as observações feitas no local.

O sistema proposto pode ser útil para a previsão do *runup* e avaliar as condições de ataque à base da

duna, de erosão, de galgamentos e de inundações de acordo com o modelo de Sallenger (2000).

AGRADECIMENTOS

Rita Nolasco pela cedência dos dados maré.

REFERÊNCIAS

Baptista, P.; Bernardes, C; Cunha, T. R. (2011). The validation analysis of the INSHORE system — a precise and efficient coastal survey system. Environmental Monitoring and Assessment 179, 1-4:589 - 604.

Gama, C., Taborda, R., Dias, J., M., A. (1997). Sobreelevaçao do Nível do Mar de Origem Meteorológica, Em Portugal Continental. "Coletânea de ideias sobre a zona costeira de Portugal", Associação Eurocast-Portugal, 131-149p, Porto.

Holman, R.A. (1986). Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. Coastal Engineering, 9, 527-544.

Masselink, G. e Hughes, M.G. (2003). Introduction to coastal processes and geomorphology. Arnold, London. 354 pp.

Nielsen, P. e Hanslow, D.J. (1991). Wave runup distributions on natural beaches. Journal of Coastal Research, 7 (4), 1139-1152.

Sallenger, A.H., Jr. (2000). Storm Impact Scale for Barrier Islands. Journal of Coastal Research, 16f3l. 8904395. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

Sancho, F., Oliveira, F.S.B.F., Freire, P. (2011). Níveis Máximos do Espraio no Litoral da Ria Formosa. 7as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. Porto.

Silva, P., Pereira, P., Baptista, P., R., Tubarão, L., Bernardes, C., Pedrosa, B., Barbosa, J., P., Abreu, T., Gabriel, S. (2014). Observações e Cálculo do Runup na Praia de Mira. 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Lisboa.

Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A. e Sallenger Jr., A.H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash and runup. Coastal Engineering, 53, 573-588.

Taborda, R., Dias, J., M., A. (1992). Análise da Sobreelevação do Nível do Mar de Origem Meteorológica Durante os Temporais de Fevereiro/Março de 1978 e Dezembro de 1981. Genovas, NºEspecial 1 "A geologia e o ambiente". 89-97p. Lisboa.

Teixeira, S. (2009). Demarcação do leito e da margem das águas do mar no litoral sul do Algarve. ARH Algarve, Departamento de Recursos Hídricos do Litoral, 207pp.

Tubarão, L. (2013). Análise do runup e da erosão costeira no setor Poço da Cruz – Praia de Mira. Projeto de Licenciatura em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica. Universidade de Aveiro.

Vieira, R., Antunes, C., Taborda, R. (2012). Caracterização da Sobreelevação Meteorológica em Cascais nos Últimos 50 anos. 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Lisboa.

WEBGRAFIA

CliM@UA, consultado a 02 de abril de 2016: http://climetua.fis.ua.pt/weather/explanation_ww3.

Evolution of the tidal prisms at the inlets of the western sector of Ria Formosa before the relocation of the Ancão inlet in November 2015

J. Jacob (1) and A. Cravo (1)

(1) Universidade do Algarve, CIMA, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal, jjacob@ualg.pt.

Abstract: The western sector of Ria Formosa represents approximately 90% of the total tidal prism of the lagoon and includes three inlets, Ancão, Faro-Olhão and Armona. The Ancão inlet was artificially opened in 1997 and since then moved eastward until November 2015, when it was relocated in the same position of 1997. This work presents a study of the evolution of the relative contribution of the three inlets to the total prism of the western sector of Ria Formosa before the last artificial opening of the Ancão inlet, using the results of (i) a previous study of other authors, (ii) two campaigns conducted in 2007 and 2009 and (iii) seventeen campaigns conducted under the "*COALA*" project, between the autumn of 2011 and the summer of 2013. In spring tide conditions the tidal prism decreased at the Ancão inlet mainly due to eastward migration while the progressive narrowing at Armona inlet was responsible for the decrease of the tidal prism in neap tide conditions.

Key words: Coastal lagoon, Ria Formosa, tidal inlets, tidal prisms, residual circulation, field campaigns.

1. INTRODUCTION

The Ria Formosa is a shallow lagoon system of about 80 km^2, 55 km long, with 6 km of maximum width and an average depth less than 2 m, located in the south coast of Portugal (Fig. 1). It is a meso-tidal system with a mean tidal range of approximately 2 m, varying from 1.5 m to 3.5 m, dominated by the semi-diurnal component of the tide and has six permanent connections to the ocean, providing a great water renewal. It is well-mixed vertically (Cravo *et al.*, 2014) due to reduced freshwater inputs and predominance of the tidal forcing in the water circulation inside it.

Due to its major relevance as a coastal system in the south of Portugal, several works has been devoted to the study of the role of the tide on the hydrodynamics of the Ria Formosa and on the dynamics of its inlets (Salles, 2001; Pacheco *et al.*, 2010; Jacob *et al.*, 2013), quantifying the tidal prisms and water exchanges with the adjacent ocean.

Furthermore, to understand the dynamics of important chemical compounds such as nutrients, chlorophyll-*a* and suspended matter it is crucial to have the knowledge and to characterize the hydrodynamics of the Ria Formosa, particularly regarding the tidal influence, water circulation and the exchanges with the ocean through the inlets. The project "Nutrients and particulate matter dynamics - exchanges between a COAstal LAgoon and the adjacent ocean through a multiple inlets system: the case of Ria Formosa, south of Portugal – *COALA*" that supports the present work, aimed to characterize the spatial distribution and the temporal scales of variability of nutrients, chlorophyll-*a* and particulate matter within the western sector of Ria Formosa, having its genesis in preliminary studies conducted at the Ancão inlet in 2007 and 2009 - *the Barrinha Nut experiments* (Alcântara *et al.*, 2012).

According to previous studies, such as Pacheco *et al*. (2010), the western sector of Ria Formosa represents approximately 90% of the total tidal prism of the entire lagoon. This sector includes 3 inlets (Fig. 1), the Ancão inlet in the western flank of the barrier system, the Faro-Olhão and Armona inlets in the eastern flank and several channels and creeks. The two main channels of this sector are the Faro channel connecting the Faro-Olhão inlet to the city of Faro and the Olhão channel connecting the same inlet to the city of Olhão.



Fig. 1. The western sector of Ria Formosa with the location of the three tidal inlets, Ancão, Faro-Olhão and Armona inlets and the two main channels, Faro and Olhão.

The Ancão inlet is a small inlet with a cyclic eastward migration behaviour. The last cycle began after its artificial relocation on 23 June 1997 in a location 3500 m west of its closing position (location A, Fig. 2). During this cycle, storm events breached the barrier updrift (2005) and downdrift (2010 and 2015) of the Ancão inlet position, opening a new inlet that competed with the older one for dominance of the tidal prism (Popesso *et al.*, 2016). While in 2005 the new inlet remained open for only three weeks and then closed naturally, in 2010 the

new inlet (position D, Fig. 2) captured a greater volume of tidal prism and forced the older inlet to close (Popesso *et al.*, 2016). Finally, the new opening of 2015 was still active in November 2015, with both inlets becoming too narrow and very shallow (Fig.2). The cycle ended in 29 November 2015 with a new relocation to a position close to 1997. The relocation is necessary to improve water exchange in the western part of Ria Formosa because in its migration towards the closing position, the Ancão inlet lost hydraulic efficiency, resulting in the decrease in the tidal prism.



Fig. 2. Image of Ancão peninsula in 8 November 2015, with the Ancão inlet near the closing position and the approximate locations over the last migration: A - initial position in June 1997 and relocation in November 2015; B – 2004, experiment of Pacheco et al. (2010); C - Barrinha Nut experiments, Spring 2007 and 2009; D - new inlet after the winter 2010 storm; E – position during COALA experiments in Autumn 2011 and Spring 2012; F - position during the last COALA experiment, in Summer 2013.

Faro-Olhão inlet was artificially opened and stabilised with jetties in 1929-1955. A consequence of these processes was the capture by this inlet of a large tidal prism from the Armona inlet (Ferreira *et al.*, 2016). Now, Faro-Olhão inlet is responsible for about 60–65% of the total tidal prism on both spring and neap tides (Jacob *et al.*, 2013).

Armona inlet is the only naturally stable inlet of the system (Pilkey *et al.*, 1989). It was the dominant natural inlet in the system, but the evolution of the Faro-Olhão inlet greatly reduced the flow through Armona inlet resulting in a shift in tidal prism dominance from Armona to Faro-Olhão (Pacheco *et al.*, 2010). Moreover, Armona inlet is narrowing for a long time without evidence that has stopped for now (Pacheco *et al.*, 2010).

Multiple tidal inlets systems, such as Ria Formosa are hydrodynamically connected and a morphological change in a given inlet could modify the water circulation of other inlets and adjacent channels. These changes are, in general, a function of the tidal prism (Ferreira *et al.*, 2016). In this work it is presented a study of the recent evolution of the tidal prisms in the three inlets of the western sector of Ria Formosa before the last relocation of the Ancão inlet, in 29 November 2015, using the results of the *COALA* experiments (Jacob *et al.*, 2013; Cravo *et al.*, 2014), the previous results of Barrinha Nut experiments (Alcântara *et al.*, 2012) and those of Pacheco *et al.* (2010) used as reference values.

2. METHODS

The *COALA* project includes five sets of experiments (17 semi-diurnal tide cycle campaigns) carried out in different periods of the year, at the three inlets of the western sector of Ria Formosa. The first set, in November and December of 2011 accomplished six semi-diurnal tide cycle samplings - two in each of the three inlets, in both spring and neap tide conditions. The second set, conducted in March and May of 2012, included seven semi-diurnal tide cycle samplings, two at the Ancão inlet and two at the Armona inlet – considering both spring and neap tide conditions – and three at the Faro-Olhão inlet, one in neap tide conditions and two in spring tide conditions. The third set of campaigns occurred in autumn 2012 and included only two campaigns at the Faro-Olhão inlet, in spring and neap tide conditions. The last two sets were at the Faro-Olhão inlet in spring tide, one in the late winter of 2013, after a period of rainfall, and the last in the summer of 2013. The date and fortnightly tidal phase of the experiments is given in Table I where the first two lines contain the information of the previous Barrinha Nut campaigns to complement the set of *COALA* experiments used in this study.

These campaigns aimed to characterize the hydrodynamics and to evaluate the nutrients and particulate matter exchanges between the lagoon and the ocean in neap and spring tides. The fieldwork in all the inlets was conducted under fair weather, fetch limited and swell protected conditions. Current velocity measurements were taken just once per hour along a cross section of each inlet (Fig. 1) due to lack of time, since other measurements of physical and chemical parameters and water collection were additionally performed. Details about the current velocity measurements can be seen in Jacob *et al.* (2013) or Cravo *et al.* (2014).

The discharge was calculated through the integration along the channel cross section of the product between the velocity component normal to the cross section and the corresponding cross-sectional area. The numerical integration in the time domain of the hourly discharge values along the flood and ebb periods provided respectively the flood and ebb tidal prisms. The residual tidal prism or net transport of water was obtained as the difference between the flood and ebb tidal prisms or, equivalently, through the numerical integration of the discharge over the complete semi-diurnal tide cycle.

Table I. Dates of the field experiments, fortnightly tide phase and tidal prisms at the inlets of the western sector of Ria Formosa.

Inlet	Date	Tide Phase	Flood Prism (m^3)	Ebb Prism (m^3)	Residual Prism (m^3)
Ancão	14/6/2007	Spring Tide	8.2×10^6	-8.9×10^6	-7.6×10^5
Ancão	27/4/2009	Spring Tide	7.8×10^6	-4.5×10^6	3.3×10^6
Ancão	22-11-2011	Spring Tide	4.04×10^6	2.95×10^6	1.08×10^6
Armona	23-11-2011		3.18×10^7	3.01×10^7	1.71×10^6
Faro-Olhão	24-11-2011		7.18×10^7	7.04×10^7	1.36×10^6
Faro-Olhão	05-12-2011	Neap Tide	3.49×10^7	3.15×10^7	3.40×10^6
Armona	06-12-2011		1.37×10^7	1.99×10^7	-6.16×10^6
Ancão	07-12-2011		2.16×10^6	2.44×10^6	-2.85×10^5
Armona	21-03-2012	Spring Tide	2.74×10^7	2.62×10^7	1.21×10^6
Faro-Olhão	22-03-2012		6.60×10^7	6.15×10^7	4.47×10^6
Ancão	23-03-2012		3.59×10^6	5.16×10^6	-1.56×10^6
Ancão	28-03-2012	Neap Tide	2.59×10^6	2.46×10^6	1.36×10^5
Armona	29-03-2012		2.22×10^7	1.60×10^7	6.20×10^6
Faro-Olhão	07-05-2012	Spring Tide	8.59×10^7	8.54×10^7	5.50×10^5
Faro-Olhão	14-05-2012	Neap Tide	3.94×10^7	3.21×10^7	7.31×10^6
Faro-Olhão	09-10-2012	Neap Tide	3.05×10^7	3.08×10^7	-3.10×10^5
Faro-Olhão	16-10-2012	Spring Tide	8.41×10^7	8.56×10^7	-1.45×10^6
Faro-Olhão	13-3-2013	Spring Tide	7.96×10^7	7.98×10^7	-2.00×10^5
Faro-Olhão	10-7-2013	Spring Tide	6.76×10^7	6.68×10^7	7.90×10^5

3. RESULTS AND DISCUSSION

The tidal prisms at the three inlets of the western sector of Ria Formosa for the Barrinha Nut experiments (first two rows) and for all the *COALA* experiments are in the last three columns of Table I. The results for the two sets of experiments that include the three inlets, Autumn of 2011 and Spring of 2012, are illustrated in Fig. 3. This figure shows the values of the flood and ebb tidal prisms relative to the total prism of the western sector obtained as the sum of the prisms for the three inlets considered in the present study. Data are also compared with those obtained by Pacheco *et al.* (2010) in campaigns carried out between 2004 and 2007, for the same inlets. This comparison reveals a time evolution of the hydrodynamic conditions in the inlets and inside the lagoon. The results obtained confirmed the Faro-Olhão inlet as the main inlet in terms of contribution for the total tidal prism. The Ancão inlet contribution is less than 6% for the total tidal prism in spring and neap tide conditions in both seasons. In addition, this study shows that in spring tide conditions the Ancão inlet lost hydraulic efficiency to the Armona inlet during flood and to both Armona and Faro-Olhão inlets during ebb. In neap tide conditions, the Armona inlet lost efficiency gained by Faro-Olhão inlet whereas the Ancão inlet prism remained stable. It should be noted that the results of Pacheco *et al.* (2010) show similar prism values for the Faro-Olhão and Armona inlet in neap tide conditions. This temporal evolution of tidal prisms can be justified by the morphological and bathymetric changes and evolution of the Ancão and Armona natural inlets while the Faro-Olhão inlet was stabilized and remains unchanged artificially. In this respect it is important to bear in mind the eastward migration of the Ancão inlet (Fig. 2), and the narrowing of the Armona inlet. Moreover, the Faro-Olhão inlet exhibits flood prisms higher than ebb prisms under both neap and spring tides (positive residual prisms), suggesting a residual circulation towards Ancão and Armona inlets.

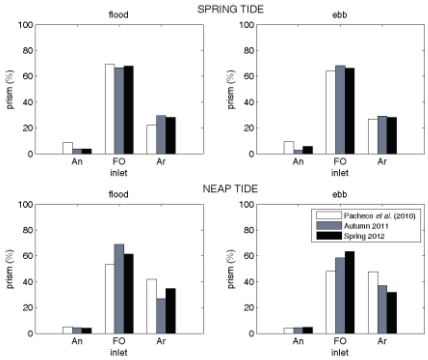


Fig. 3. Relative tidal prisms at cross sections at the inlets of the western sector of Ria Formosa: Pacheco et al. (2010) results (white bars) versus *COALA field experiments, Autumn 2011 (gray bars) and Spring 2012 (black bars). An – Ancão inlet, FO – Faro-Olhão inlet and Ar – Armona inlet.*

In Fig. 4 it is shown the time evolution of the Ancão inlet tidal prisms relative to the data of Pacheco *et al.* (2010), from 2004 to 2012, date of the last campaign in Ancão inlet. It can be seen that the tidal prisms remained relatively unchanged until 2009 (Barrinha Nut campaign) and decreased 50% or more since the first *COALA* campaign in 2011. This can be associated to the *jump* of the Ancão inlet in the winter of 2010 (Popesso *et al.*, 2016), after the breaching downdrift of the inlet induced by a storm.

The evolution of the Faro-Olhão inlet tidal prisms in relation to the experimental values of Pacheco *et al.* (2010), from 2006 until the summer of 2013, period of the last *COALA* campaign, is represented in Fig. 5. In spring tide conditions, a small increase in tidal prism of approximately 25% is observed in spring 2012, followed by a slight decrease towards the last campaign. This can be justified by the variability of ranges and periods of the specific tides sampled at Faro-Olhão inlet. However, in neap tide conditions an increase in Faro-Olhão tidal prisms of about 75%

is observed after autumn 2011. As stated before, in neap tide conditions the tidal prism does not change in the Ancão inlet but decreases in the Armona inlet and the capture and increase of tidal prism in Faro-Olhão inlet is related to this fall. This fact matched the *jump* of Ancão inlet in the winter 2010 but it is mainly due to the narrowing of the Armona inlet.

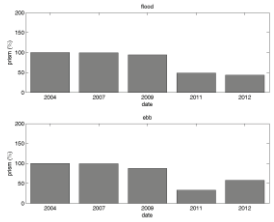


Fig. 4. Time evolution of the tidal prisms in the Ancão inlet relative to the Pacheco et al. (2010) results, including the Barrinha Nut (Spring of 2007 and 2009) and COALA field experiments (Autumn 2011 and Spring 2012).

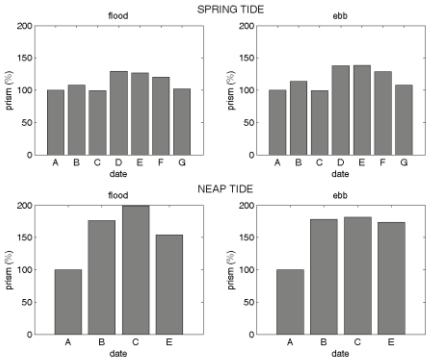


Fig. 5. Time evolution of the tidal prisms in Faro-Olhão inlet relative to the Pacheco et al. (2010) results: A- 2004 (Pacheco et al., 2010); B - Autumn 2011; C-D - Spring 2012; E – Autumn 2012; F – Winter 2013; and G – Summer 2013.

4. CONCLUSIONS

This study has provided additional quantitative information about the tidal prisms in the western sector of Ria Formosa. The comparison of recent tidal prisms with previous values (Pacheco *et al.*, 2010) reveals a time evolution of the hydrodynamic conditions in the inlets and inside the lagoon. Faro-Olhão inlet as artificially stabilized is relatively unchanged, while the other two inlets showed loss of hydraulic efficiency over the last 10-11 years. These changes associated with temporal evolution of the tidal prisms are due to morphodynamic and morphological changes in the Ancão and Armona natural inlets. In spring tide conditions, Ancão inlet lost hydraulic efficiency, mainly gained by the Armona inlet due to eastward migration. Results clearly showed the influence of the storm induced breaching occurred downdrift of the Ancão inlet in the winter of 2010. Concerning the Armona inlet, in neap tide conditions it lost efficiency for the Faro-Olhão inlet, due to the progressive narrowing of the Armona inlet.

This evolution of the hydrodynamic conditions at the inlets of the western sector of Ria Formosa, before the relocation of the Ancão inlet, may unbalance or disturb the circulation patterns that ultimately can affect the chemical and biological cycles.

Acknowledgements

The authors acknowledge Commanders Guilherme Marques Ferreira and Conceição Duarte, Captains of Faro and of Olhão ports respectively, for providing the conditions to conduct the field work. We are also grateful to all the collaborators and team members for their support during the campaigns. This work was financially supported by Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT) under the project ref: "PTDC/MAR/114217/2009-COALA".

REFERENCES

Alcântara, P., Cravo, A. and Jacob, J. (2012). Variability of nutrients and chlorophyll-*a* in Ancão inlet during a spring tidal cycle in April 2009. *Ciencias Marinas* 30 (1B), 161-176.

Cravo, A., Cardeira, S., Pereira, C., Rosa, M., Alcântara, P., Madureira, M., Rita, F., Luis, J., and Jacob, J. (2014). Exchanges of nutrients and chlorophyll a through two inlets of Ria Formosa, South of Portugal, during coastal upwelling events. *Journal of Sea Research*, 93, 63-74.

Ferreira, O., Matias, A. and Pacheco, A. (2016). The east coast of Algarve: a barrier island dominated coast. *Thalassas*, 1-10.

Jacob, J., Cardeira, S., Rodrigues, M., Bruneau, N., Azevedo, A., Fortunato, A.B., Rosa, M.,Cravo, A. (2013). Experimental and numerical study of the hydrodynamics of the western sector of Ria Formosa. *Journal of Coastal Research*, 65, 2011-2016.

Pacheco, A., Ferreira, Ó., Williams, J.J., Garel, E., Vila-Concejo, A. and Dias, J.A. (2010). Hydrodynamics and equilibrium of a multiple-inlet system. *Marine Geology*, 274, 32–42.

Pilkey, O., Neal, W., Monteiro, J.H. and Dias, J.A. (1989). Algarve barrier islands: a non coastal-plain system in Portugal. Journal of Coastal Research 5(2), 239–261.

Popesso, C., Pacheco, A., Ferreira, O. and Fontolan, G. (2016). Evolution of a relocated inlet migrating naturally along an open coast. *Journal of Coastal Research*, SI 75, 233-237.

Salles, P. (2001). *Hydrodynamic Controls on Multiple Tidal Inlet Persistence*. Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, PhD thesis, 272p.

Estudo e Análise da Vulnerabilidade Costeira face a cenários de subida do nível médio do mar devido às alterações climáticas

C. Rocha (1), C. Antunes (2) e C. Catita (2)

(1) Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, carolina.silrocha@gmail.com.

(2) IDL – Instituto Dom Luiz, FCUL – Universidade de Lisboa.

Resumo: Portugal Continental tem uma costa densamente povoada, possuindo atividades com elevado valor económico e concentração de infraestruturas. A identificação das zonas costeiras vulneráveis a eventos extremos e à subida do nível do mar, com inundação total ou parcial, é fundamental para uma adequada gestão e avaliação de risco costeiro. Este estudo, em desenvolvimento, visa avaliar a vulnerabilidade costeira em Portugal Continental para 2025, 2050 e 2100 com diferentes cenários de subida do nível médio do mar e diferentes períodos de retorno de eventos extremos. Os dados usados contemplam informação dos marégrafos de Leixões, Cascais, Sines e Lagos, dados altimétricos de elevada precisão e resolução espacial e dados relativos à ocupação e uso do solo. Como resultado, pretende-se produzir uma cartografia temática de vulnerabilidade de inundação ao longo da costa, obter uma estimativa rigorosa da área de terreno afetada pelo avanço do mar e o recuo da linha de costa face aos cenários considerados.

Palavras-chave: vulnerabilidade costeira, subida do nível médio do mar, sobre-elevação meteorológica, galgamento, recuo da linha de costa.

1. INTRODUÇÃO

A zona costeira de Portugal Continental é amplamente reconhecida por ter um valor natural, económico e cultural ímpar. No entanto, a diversidade de atividades que esta suporta induz, frequentemente, a conflitos de interesses conduzindo a estratégias de intervenção contraditórias e consequentes. Este facto tem conduzido, desde há décadas, à degradação do sistema costeiro, em grande parte devido aos problemas relacionados com a erosão costeira e redução da alimentação sedimentar (Santos *et al.*, 2014). Controlar e inverter o problema não será uma tarefa fácil uma vez que a recuperação do litoral é um processo complexo e demorado. Esta recuperação e proteção, que deve ser encarada como um desígnio nacional, só poderá ser atingida com uma gestão baseada no conhecimento, identificando as causas, reconhecendo a respetiva dinâmica e intervindo a favor da natureza (Santos *et al.*, 2014).

A análise das vulnerabilidades de uma zona costeira e da sua evolução ao longo do tempo, em relação às ações energéticas do mar, é essencial em termos de ordenamento, uma vez que este é função dos valores humanos, económicos, ecológicos e culturais de cada zona (Coelho *et al.*, 2006).

A aplicação da metodologia proposta, recorrendo a técnicas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), possibilitará a elaboração de uma cartografia de vulnerabilidade ao longo de toda a linha de costa de Portugal Continental.

2. ANÁLISE DA VULNERABILIDADE COSTEIRA DE PORTUGAL CONTINENTAL

A vulnerabilidade das zonas costeiras às ações energéticas do mar pode ser entendida como a predisposição a um dado risco, englobando diversos elementos e conceitos, como a sensibilidade ou suscetibilidade ao dano e a falta de capacidade para se adaptar (IPCC, 2014).

A análise da vulnerabilidade do litoral de Portugal Continental aos cenários de subida do NMM requer a ponderação de diversos fatores, como por exemplo, a dinâmica do litoral e os respetivos processos de forçamento.

Para além de fenómenos extremos e de curta duração, existe na zona costeira uma dinâmica natural, frequentemente intensificada ou antecipada através de ações antropogénicas, que entra em conflito com as atividades e ocupação humana. Como resultado dessa dinâmica existe atualmente, em muitas zonas costeiras, uma situação generalizada de erosão e de recuo da linha de costa, com valores preocupantes a médio e a longo prazo (Coelho *et al.*, 2006).

É necessário referir que a análise de vulnerabilidade é feita ao longo de toda a costa continental, requerendo para tal informação adequada, tanto em qualidade como em quantidade, contendo diversas variáveis e fatores físicos. Fatores antropogénicos, de origem económica e ambiental, serão adicionados apenas em análises futuras a nível local em casos

específicos de maior vulnerabilidade detetados nesta fase inicial.

2.1. Cenários de extremos do Nível do Mar

Os diferentes cenários de subida do NMM para 2025, 2050 e 2100 com diferentes períodos de retorno de eventos extremos foram calculados com base na informação dos marégrafos de Leixões, Cascais, Lisboa e Lagos. Assim, foi possível dividir e caracterizar o território em quatro zonas: Norte, Centro, Sul e Algarve, respetivamente.

Com exceção dos dados do marégrafo de Cascais, os valores para Leixões, Lisboa e Lagos resultam de séries de dados mais curtas e incompletas com dados entre 1970 e 2010. Os registos de valores extremos de sobre-elevação metereológica (SM) superiores a 10 cm foram caracterizados, em termos de frequência e amplitude, através de uma análise de extremos seguindo a metodologia apresentada em Vieira *et al*. (2012), com a qual se obtiveram curvas de períodos de retorno para cada porto maregráfico.

Tomando como referência a maré astronómica de 2010, calculou-se a curva de frequência do nível de maré para as quatro regiões (incluindo Sines para a região sul). A escolha do ano de 2010, como referência, deve-se ao fato de as respetivas marés equinociais corresponderem a valores máximos, o que se verifica a cada 4 a 5 anos (ciclos quatri-nodais) devido às variações da órbita da Lua. Desta forma define-se assim como referência um cenário de extremo máximo de maré.

Aos valores de altura de maré das curvas de frequência foi retirado o respetivo valor de referência do Zero Hidrográfico (ZH), de forma a reduzir as elevações do nível de maré ao *datum* vertical cartográfico, o *Datum* de Cascais de 1938 e, desta forma, compatibilizar os níveis de maré com o sistema de altitude ortométricas do Modelo Digital de Terreno (MDT) usado no sistema de análise de vulnerabilidade.

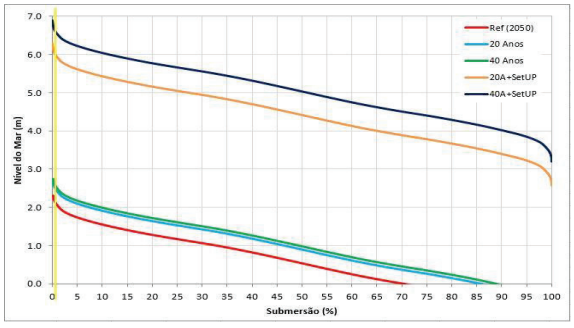


Fig. 1. Curvas de percentil de submersão para o NMM em 2050, para: a) Modelo de maré mais SM (20 e 40 anos); e, b) modelo de maré meteorológica mais setup de agitação marítima (20A+SetUp e 40A+SetUp). A linha amarela intersecta as 5 curvas de percentil para o valor 0.25% de submersão.

Baseado em valores de projeção de subida do NMM de Antunes (2011), foram calculados os percentis de submersão de maré para os três períodos dos cenários em estudo, 2025, 2050 e 2100, adicionando-se os valores respetivos de projeção do NMM. Sobre estas curvas de referência das frequências de submersão do nível do mar projetado, foi adicionada a SM para dois períodos de retorno, acrescida ainda de valores de *setup* de agitação marítima (dinâmico e estático).

A partir das curvas de percentil de submersão anual resultantes (Fig. 1) são extraídas as cotas para cada cenário de inundação para níveis extremos, correspondentes a 0.25% (máxima preia-mar), 5% (preia-mar de águas vivas) e 10% (preia-mar média). Porém, nesta comunicação serão apenas apresentados valores extremos de cota de inundação para 0.25% de submersão (Tabela I).

Tabela I. Tabela de 0.25% de submersão para as quatro zonas costeiras com diferentes períodos de retorno consoante para dois modelos de maré: a) modelo de maré mais SM; b) maré meteorológica mais setup de agitação marítima.

ZONA	Modelo de Maré	2025 Ref	2025 Período de Retorno 10 anos	2025 Período de Retorno 20 anos	2050 Ref	2050 Período de Retorno 20 anos	2050 Período de Retorno 40 anos	2100 Ref	2100 Período de Retorno 25 anos	2100 Período de Retorno 50 anos
NORTE	a	2.09	2.4	2.5	2.30	2.7	2.7	3.01	3.4	3.5
	b		5.9	6.5		6.2	6.8		7.0	7.6
CENTRO	a	2.00	2.3	2.4	2.21	2.6	2.7	2.92	3.3	3.4
	b		5.8	6.4		6.1	6.7		6.8	7.4
SUL	a	1.98	2.2	2.3	2.19	2.5	2.6	2.90	3.3	3.3
	b		5.1	5.9		5.4	6.1		6.2	6.8
ALGARVE	a	1.95	2.2	2.3	2.16	2.5	2.6	2.87	3.2	3.3
	b		5.1	5.8		5.4	6.1		6.1	6.8

De modo a incorporar os cenários de subida do NMM e sua incerteza no índice de vulnerabilidade foi calculado, com recurso a um MDT de 20 m de resolução espacial, o desnível de inundação em cada ponto, isto é, a altura de coluna de água da zona inundada (cota de inundação menos cota de terreno). Para calcular um índice, de 1 a 5, relativo à perigosidade da inundação, considera-se a incerteza dos modelos de frequência de submersão (Tabela II), resultante da estimativa do desvio padrão dos níveis máximos de maré, da subida do NMM e da SM

$$\sigma_{cenário} = \sqrt[2]{\sigma_{maré}^2 + \sigma_{NMM}^2 + \sigma_{SM}^2} \qquad (1)$$

em que cada valor de incerteza de cada cenário vai depender do ano de projeção.

Tabela II. Desvio padrão (em cm) de cada cenário de projeção, tendo em conta as três componentes que compõem o cenário de inundação: a) maré; b) subida do nível médio do mar; c) sobre-elevação meteorológica

ANO DE PROJEÇÃO	$\sigma_{maré}$	σ_{NMM}	σ_{SM}	$\sigma_{cenário}$
2025	5	3	5	**8**
2050	5	7	9	**12**
2100	5	36	15	**40**

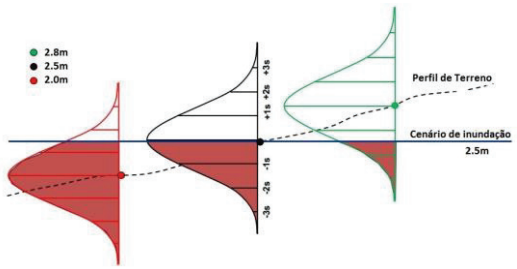


Fig. 2. Método de cálculo da probabilidade de inundação de um dado local (2.0m, 2.5m e 2.8m de cota), com base na cota máxima de maré sobre-elevada (h= 2.5m) e da sua incerteza (adaptado de Marcy et al., 2011).

Com base nas incertezas estimadas por (1) são calculadas curva padrão de distribuição Normal (Fig. 2), a partir da qual se podem determinar índices de vulnerabilidade, de 1 (menor probabilidade) a 5 (máxima probabilidade), do forçamento costeiro.

2.2. Parâmetros de Vulnerabilidade

A escolha dos parâmetros de vulnerabilidade pode ser complexa e depende muito da análise que se pretenda realizar. Para este trabalho foram selecionados sete parâmetros de vulnerabilidade, para serem avaliados e classificados individualmente. Cada um dos fatores será classificado numa escala de 1 a 5, de modo a expressar o seu contributo para a vulnerabilidade costeira, sendo 5 o nível mais alto e 1 o mais baixo. Na Tabela III é apresentada a classificação de vulnerabilidade dos parâmetros físicos selecionados.

Até à data ainda não se possui uma rede hidrográfica consistente e devidamente classificada, de modo a considerar a sua influência na vulnerabilidade de forçamento costeiro.

O tipo de linha de costa em Portugal Continental, apresenta um traçado bastante regular, mas é variável de acordo com a natureza dos materiais rochosos que a constituem e, embora o litoral Português seja dominado essencialmente por praias, existem áreas de costa predominantemente rochosa. Assim pode-se definir dois tipos de costa, a costa de arriba e a costa baixa e arenosa. São estes os dois fatores considerados para o índice de vulnerabilidade.

A distância à linha de costa é um fator importante nesta análise, uma vez que a vulnerabilidade aumenta com a proximidade à zona de interação com o mar. Uma vez que são considerados dois modelos de máximo de maré: o modelo de maré mais SM e o modelo de maré meteorológica mais *setup* de agitação marítima, o fator de distância à linha de costa não é utilizado de igual forma quando se considera o efeito de galgamento resultante da agitação marítima extrema.

A cartografia da Geologia Sólida e da Deriva Geológica permite avaliar a natureza das rochas e dos sedimentos que constituem a região costeira, e fazer uma classificação baseada no comportamento desses materiais quando sujeitos a ação de forçamento do mar. Por exemplo, as rochas magmáticas ou eruptivas são rochas de elevada dureza e por isso de reduzida vulnerabilidade, ao contrário dos sedimentos não consolidados de pequenas dimensões (Coelho *et al.*, 2006).

O fator da cartografia do Uso do Solo reflete os diferentes comportamentos morfológicos, tratando-se de uma orla costeira revestida de vegetação, pavimentada ou sem qualquer tipo de revestimento. Considera-se assim, que quanto maior for o nível de alteração do estado natural de revestimento de um solo, maior será a sua vulnerabilidade.

Tabela III. Classificação de vulnerabilidade dos parâmetros físicos para Portugal Continental, onde 1 significa baixa contribuição e 5 elevada contribuição para a vulnerabilidade.

PARÂMETROS	1	2	3	4	5
REDE HIDROGRÁFICA	não está contido				está contido
DISTÂNCIA À LINHA DE COSTA	≥ 1000 m	200m – 1000m	50m – 200m	20m – 50m	≤ 20m
TIPO LINHA COSTA	Costa de arriba				Costa baixa e arenosa
GEOLOGIA SÓLIDA	Rochas Eruptivas Plutónicas e Vulcânicas		Form. Sedimentares e Metamórficas		Form. Sedimentares
DERIVA GEOLÓGICA	urbano; rocha	pedra; argila		praias; depósitos	aluvião; areia solta; cascalhos;
USO DO SOLO	corpos de água; pântano; escassa vegetação; rocha nua	areias costeiras	floresta	agricultura	infraestruturas urbanas e industriais

2.3. Processo de análise hierárquica (AHP)

O método *Analytic Hierarchy Process (*AHP) destina-se a hierarquizar um conjunto de alternativas avaliadas em função de um conjunto de critérios. Este método calcula os pesos usados na ordenação das alternativas a partir de uma matriz onde o decisor efetua comparações de relação de importância entre os critérios (atributos) característicos das diferentes alternativas (Le Cozannet *et al*., 2013).

Segundo Saaty (1987), este método surgiu da necessidade de dar resposta à combinação de diferentes alternativas, medidas em diferentes escalas de referência, a serem analisadas tendo em conta a experiência e a perceção do valor dos decisores. Foi usada a escala de nove níveis proposta por Saaty (1987) na comparação par a par.

Tabela IV. Escala de preferências com nove níveis, proposta por Saaty (1987).

INTENSIDADE DE IMPORTÂNCIA	DEFINIÇÃO	EXPLICAÇÃO
1	Igual importância	Duas atividades contribuem com igual importância
3	Importância moderada de um sobre o outro	A experiência e o julgamento favorecem moderadamente uma atividade em detrimento da outra
5	Importância forte ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em detrimento da outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida e é demonstrado na prática
9	Importância extrema	Não existe outra atividade com tanta importância comprovada
2,4,6,8	Valores intermédios entre dois conjuntos adjacentes	Quando necessário
RECÍPROCOS	Se a atividade *i* tem um dos números acima diferentes de zero quando comparada com a atividade *j*, então *j*, tem o valor recíproco quando comparado com *i*	Suposição razoável

Deste modo, foi construída uma matriz de comparação par a par para cada um dos parâmetros em análise (Tabela V), com a qual se obteve o peso a dar a cada um dos parâmetros para a determinação do índice de vulnerabilidade.

Tabela V. Matriz de comparação par a par dos parâmetros físicos e sua respetiva contribuição (em percentagem) no índice de vulnerabilidade costeira

PARÂMETROS FÍSICOS	Cenário de Inundação	Rede Hidrográfica	Tipo de Linha de Costa	Distância à linha de costa	Geologia Sólida	Deriva Geológica	Uso do Solo	Contribuição no índice de vulnerabilidade
CENÁRIO DE INUNDAÇÃO	**1.00**	2.00	3.00	3.00	5.00	7.00	8.00	**34 %**
REDE HIDROGRÁFICA	0.50	**1.00**	2.00	2.00	3.00	5.00	7.00	**21 %**
TIPO DE LINHA DE COSTA	0.33	0.50	**1.00**	1.00	3.00	5.00	7.00	**15 %**
DISTÂNCIA À LINHA DE COSTA	0.33	0.50	1.00	**1.00**	3.00	5.00	7.00	**15 %**
GEOLOGIA SÓLIDA	0.20	0.33	0.33	0.33	**1.00**	3.00	5.00	**8 %**
DERIVA GEOLÓGICA	0.14	0.20	0.20	0.20	0.33	**1.00**	3.00	**4 %**
USO DO SOLO	0.13	0.14	0.14	0.14	0.20	0.33	**1.00**	**2 %**

3. RESULTADOS

Como já foi referido anteriormente, os cenários de subida do NMM e o índice de vulnerabilidade foram calculados sob um MDT da zona costeira de Portugal Continental.

Na Fig. 3 e Fig. 4 é possível visualizar as zonas inundáveis em 2050 e 2100, respetivamente, com o modelo de maré mais SM. É de notar que o período de 2050 a zona costeira da Costa da Caparica ficará possivelmente com algumas infraestruturas (habitações e vias de comunicação) afetadas com a subida do NMM e a maré máxima a atingir uma cota de 2.7 m. Cenário que poderá ocorrer em 0.25% do ano, ou seja, o correspondente a algumas horas nos períodos de preia-mar máxima de marés vivas equinociais. No caso de ocorrência do cenário que correspondente a um nível de submersão de 0.25% em 2100, com SM de 50 anos de período de retorno, é de notar um acréscimo significativo na área que será inundável, mesmo que esporadicamente. Essa área, correspondente a quase 5 Km^2, engloba a maior parte das infraestruturas da zona costeira da Costa da Caparica.



Fig. 3. Cenário de inundação em 2050, com o modelo de maré mais SM com período de retorno de 40 anos para 0.25% de submersão. Zoom feito para a zona da Costa da Caparica.

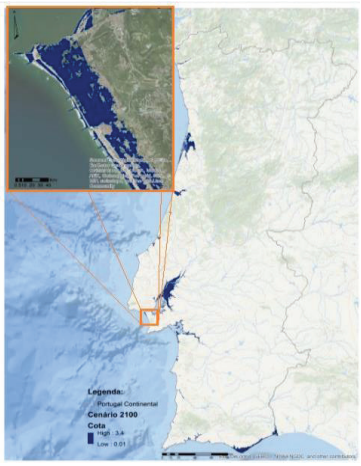


Fig. 4. Cenário de inundação em 2100, com o modelo de maré mais SM com período de retorno de 50 anos para 0.25% de submersão. Zoom feito para a zona da Costa da Caparica.

4. CONCLUSÕES

Os resultados aqui apresentados são ainda preliminares, dada a dificuldade de desenvolver uma base de dados consistente e coerente para ser analisada em ambiente SIG. Como tal, não foi ainda possível determinar o índice de vulnerabilidade costeiro para os três períodos de cenários futuros (2025, 2050 e 2100) e com os diferentes períodos de retorno e percentagem de submersão.

No entanto, esta comunicação pretende apresentar a metodologia que será adotada quando estiverem reunidos todos os dados necessários, com a qualidade exigível para este tipo de trabalho.

Agradecimentos

À Direção Geral do Território pela cedência dos dados do modelo digital de terreno de alta resolução.

REFERÊNCIAS

Antunes, C. (2011). Variação atual do NMM em Cascais. *Atas da VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia – CNCG2011*, Porto, 358-365.

Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F., Taveira Pinto, F. (2006). A Vulnerability analysis approach for the Portuguese West Coast. *Risk Analysis V: Simulation and Hazard Mitigation*, 251-262.

IPCC (2014). Annex II: Glossary. In: *Climate Change 2014, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1757-1776.

Le Cozannet, G., M., Bulteau, T., Mirgon, C., Yates, M. L., Méndez, M., Baills, A., Idier, D., and Oliveros, C. (2013). An AHP – derived method for mapping the physical vulnerability of coastal areas at regional scales. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 1209-1227.

Marcy, D., Herol N., Waters K., Brooks W., Handley B., Pendleton M., Schmid K., Sutherland M., Dragonov K., McCombs J., Ryan S. e Bladwin Group (2011). New Mapping Tool and Techniques for Visualizing Sea Level Rise and Coastal Flooding Impacts. *NOAA Costal Services Center*, South California, pp20.

Saaty, R.W. (1987). The Analytic Hierarchy Process – What i tis and how i tis used. *Math Modelling*, 9, 161-176.

Santos, F., Lopes, A.M., Moniz, G., Ramos, L. e Taborda, R. (2014). Gestão da Zona Costeira – O Desafio da Mudança. *Relatório do Grupo de Trabalho do Litoral*, pp255.

Vieira, R., Antunes, C. e Taborda, R. (2012). Caracterização da sobreelevação meteorológica em Cascais nos últimos 50 anos. *Atas das 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 175-178.

Intensidade energética sob temporais marítimos: casos de estudo de Espinho e do litoral da Ria Formosa

F. Sancho (1), A.S. Beirão (2) e M.G. Neves (1,2)

(1) Dep. de Hidráulica e Ambiente, LNEC, Av. Do Brasil, 101, Lisboa. fsancho@lnec.pt

(2) FCT/UNL. Campus da Caparica, 2829-526 Caparica

Resumo: O presente trabalho pretende contribuir para o conhecimento das condições de agitação marítima mais severas incidentes no litoral, através da análise e classificação da intensidade energética da agitação em condições de temporal marítimo. A metodologia anteriormente aplicada em Sancho *et al*. (2013) à orla costeira de Espinho é estendida ao litoral da Ria Formosa, na costa sul de Portugal continental, evidenciando a distinta exposição entre os setores nascente e poente do Cabo de Santa Maria.

Resulta ainda desta comparação que apesar da intensidade média (por temporal) da agitação marítima no litoral da Ria Formosa ser somente cerca de 1/2 a 1/5 da intensidade média de um temporal marítimo no litoral de Espinho, o balanço anual da energia incidente (sob temporal) evidencia uma razão da ordem de 1/10 entre os dois locais.

Palavras-chave: temporal marítimo, energia de onda, agitação marítima, Ria Formosa, intensidade energética.

1. INTRODUÇÃO

A observação de erosão costeira e a ocorrência de galgamentos e inundações costeiras em vários locais da orla costeira continental Portuguesa têm conduzido a uma preocupação e risco crescente para as populações e atividades socioeconómicas aí instaladas. Além disso, a continuada migração da população para o litoral tem contribuído para o aumento da pressão urbanística nesta faixa territorial, exacerbando os riscos de erosão costeira.

É sabido que a erosão costeira está associada à agitação marítima incidente, sendo por isso determinante conhecer melhor a intensidade e variabilidade (espacial) da mesma ao longo da costa. Por outro lado, a erosão deve-se fundamentalmente à ação de ondas mais energéticas, i.e. com alturas de ondas acima de determinado limiar, como os estados de agitação marítima (vaga e ondulação) que ocorrem em situação de temporal marítimo.

Assim, pretende-se neste trabalho dar continuidade ao trabalho desenvolvido por Heitor (2013) e Sancho *et al*. (2013), de forma a quantificar e classificar a agitação marítima em situação de temporal marítimo em diferentes zonas da costa continental portuguesa. Em particular, aqueles autores avaliaram a intensidade energética da agitação marítima na orla costeira de Espinho, reconhecida pela existência de intensa agitação marítima e elevados problemas de erosão costeira.

Aqui e em Beirão (2015), a mesma metodologia é aplicada à orla marítima da Ria Formosa, na costa sul de Portugal continental, evidenciando a distinta exposição entre os setores a nascente e a poente do Cabo de Sta. Maria. Apresenta-se também a comparação dos resultados (da avaliação da intensidade energética sob a ação de temporal marítimo) para as duas faixas litorais de Espinho e da Ria Formosa, evidenciando-se as diferenças encontradas face a avaliações baseadas em outras metodologias frequentemente utlizadas, como a potência média anual (e.g., "ONDATLAS", INETI, 2003; Pontes *et al*. 2005) ou a altura significativa máxima (e.g., Carvalho e Capitão, 1995; Costa *et al*., 2001).

2. METODOLOGIA

De acordo com Mendoza *et al*. (2011) (ver também Sancho *et al*., 2013), a intensidade energética em situação de temporal pode ser definida por uma variável *I*, proporcional à energia da agitação marítima ($E = \frac{1}{8}\rho g H_{rms}^2$), dada por:

$$I = \int_{t1}^{t2} H_s^2 dt \qquad (1)$$

em que H_s representa a altura significativa de onda ($H_s = \sqrt{2} H_{rms}$) acima de determinado limiar quando ocorre uma tempestade marítima, e *t1* e *t2* são os instantes inicial e final dessa tempestade e *dt* o intervalo de tempo entre medições. De forma a poder aplicar o mesmo critério de início de tempestade em todo o litoral de estudo, decidiu-se aplicar o limiar $H_s > 3$ m sugerido em Sancho *et al*. (2013) para o presente estudo. Igualmente, admitiu-se que esse limiar teria de ser superado durante um mínimo de 6 horas e considerou-se que duas tempestades consecutivas seriam na realidade uma única quando o período em que $H_s > 3$ m fosse inferior a 48 horas. Considerando a duração de um

temporal em horas, as unidades da intensidade energética são m^2h.

Para o cálculo da agitação marítima na orla costeira, propagaram-se as condições de agitação do largo até à costa utilizando o modelo numérico SWAN (2013) com uma configuração e parametrização convencionais (Heitor, 2013; Beirão, 2015). Para cada aplicação do modelo, utilizou-se como condição fronteira uma série de dados de agitação marítima sobre a plataforma continental portuguesa, proveniente de resultados de *hindcast*.

Assim, através do modelo SWAN, determinaram-se séries locais da agitação marítima junto à costa, a partir das quais se identificaram as condições de temporal e determinaram os valores da intensidade energética (para cada temporal). Obteve-se, em cada localização, uma série de valores de intensidades energéticas por temporal, a partir da qual se calcularam parâmetros estatísticos.

3. CASOS DE ESTUDO E RESULTADOS

3.1. Casos de Estudo

As zonas da costa continental portuguesa escolhidas para este estudo foram: Espinho (Figura 1) e Ria Formosa (Figura 2).

Para o caso de Espinho foi adotado um domínio de cálculo do modelo numérico SWAN cobrindo uma extensão de 70 km na perpendicular à costa e 100 km na direção paralela a esta, com uma resolução espacial de 500m. Os dados ao largo utilizados na propagação da agitação marítima são relativos ao período entre 1953 até 2009, calculados por Dodet *et al*. (2010), para o ponto ao largo da Figueira da Foz, de coordenadas 10.0º W, 40.0º N (Sancho *et al*., 2013). Os resultados do modelo foram extraídos em 26 localizações com um espaçamento de 500 metros entre si, numeradas sequencialmente de Sul para Norte, próximas da batimétrica 15 m (ZH), em frente à zona de estudo (Figura 1). Mais detalhes desta aplicação estão descritos em Heitor (2013).

Para a Ria Formosa foi adotada um domínio que abrange o tramo do litoral Algarvio inserido entre a Quarteira e a ilha de Tavira, apresentando as dimensões de 75 km na direção E-W e 35.5 km, na direção N-S. A resolução espacial adotada foi também de 500 m. Os valores das séries temporais da agitação marítima ao largo (no ponto com as coordenadas 36.75°N; 8.00° W) foram retirados das bases de dados SIMAR-44 e WANA (ponto SIMAR 1048047), disponíveis no portal da Agência Espanhola "*Puertos del Estado*" (http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx). Utilizou-se aqui um total de 55 anos de dados, de 1958 a 2013, com valores a cada 6 horas. Estes dados, apesar de resultarem de reconstituição da agitação marítima, contêm falhas na sua continuidade que, não obstante, são somente da ordem de 0.3% do período total, sensivelmente igualmente distribuídas nos períodos do inverno e verão marítimos (Beirão, 2015). Os resultados do modelo SWAN foram extraídos em 21 localizações, numeradas de Oeste para Este, próximas da batimétrica 15 m (ZH) (Figura 2).

Em ambas as zonas costeiras de estudo, a série de dados ao largo foi suficientemente extensa de forma a garantir uma boa representatividade de condições de temporal. A proximidade na duração das séries temporais (56 anos para Espinho e 55 anos para a Ria Formosa), cobrindo sensivelmente o mesmo período, garante ainda a inter-comparabilidade entre os resultados.



Fig. 1. Localização dos pontos de saída do modelo no Caso de Estudo Espinho.



Fig. 2. Localização dos pontos de saída do modelo no Caso de Estudo Ria Formosa.

3.2. Resultados da intensidade energética

A Figura 3 apresenta os valores das intensidades energéticas médias por temporal, ao longo dos 26 e 21 pontos distribuídos, respetivamente no litoral de Espinho e da ria Formosa. Como seria de esperar, as intensidades energéticas médias por temporal são mais intensas na costa de Espinho que na costa sul. Por outro lado, enquanto os valores a norte são relativamente uniformes, variando entre 840 e 980 m^2h, a sul existe maior variabilidade, entre 150 e 490 m^2h, com valores assaz mais elevados a poente do Cabo de Sta. Maria (localização<12) do que a nascente do mesmo (localização>12). Esta assimetria na costa sul resulta, naturalmente, da diferente orientação da costa relativamente à agitação marítima predominante em situação de temporal, do setor SW (Costa *et al*., 2011).

Em termos médios, por região analisada, a intensidade energética por temporal em Espinho é igual a 896 m^2h e na Ria Formosa é igual a 306 m^2h, o que se traduz numa relação de um temporal médio a norte ser quase três vezes mais intenso que a sul.

A título comparativo, a Figura 4 apresenta a variação, por região, da altura significativa média por temporal. Isto é, para cada localização, representa-se o valor médio, para todos os temporais, do valor médio de *Hs* durante cada temporal. Como esta figura mostra, as diferenças a norte e a sul não são significativas, apesar de se reconhecer (e.g., Costa *et al.*, 2011) que as alturas significativas extremas a norte são muito superiores às observadas a sul. Ou seja, mesmo ocorrendo em Espinho vários temporais com *Hs* máximo superior a 6 m (e.g., Sancho *et al.*, 2013), e na Ria Formosa raramente exceder esse valor (Beirão, 2015), quando se analisa a média das alturas significativas médias por temporal, os valores das duas regiões são próximos.

No entanto, a intensidade energética média por temporal (Figura 3) não traduz cabalmente a diferença real de intensidade energética em cada região. Efetivamente, os resultados obtidos para o número médio de temporais marítimos (em que $H_s > 3$ m) em cada região é muito distinto (Figura 5). Enquanto no litoral de Espinho existem em média 12 a 13 temporais por ano, na Ria Formosa o número médio oscila entre 0.5 a 4 na região a oriente ou a ocidente do Cabo de Sta. Maria, respetivamente.

Ocorre ainda que a duração média dos temporais marítimos é sensivelmente o dobro em Espinho que na Ria Formosa (Figura 6), justificando assim o resultado obtido para a intensidade energética média por temporal (Figura 3). Ou seja, existe forte correlação entre estas duas variáveis.

Apesar das diferenças expostas entre as duas regiões serem importantes, os resultados já apresentados não evidenciam a real diferença da severidade da agitação marítima ou da intensidade energética existente, mas apontam para que um indicador mais completo e representativo contemple tanto a intensidade média por temporal, como o seu número médio anual. Assim, o inclui estes dois fatores.

Assim, a Figura 7 apresenta a variabilidade espacial do valor médio anual da intensidade energética sob temporal para cada uma das regiões e evidencia uma razão da ordem de 1/10 a 1/50 entre a intensidade na Ria Formosa e em Espinho. Este indicador – a intensidade energética média anual (*IEMA*) sob temporal marítimo – tem em cada região uma variabilidade que se verifica ser bem correlacionada com o número médio anual de temporais (Figura 5).

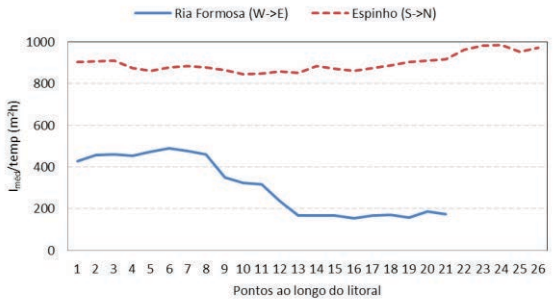


Fig. 3. Intensidade energética média por temporal ao longo dos trechos litorais de Espinho e da Ria Formosa.

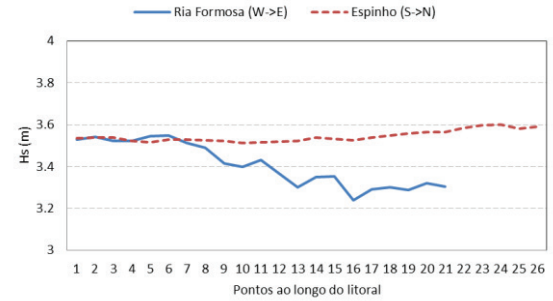


Fig. 4. Altura significativa média por temporal ao longo dos trechos litorais de Espinho e da Ria Formosa.

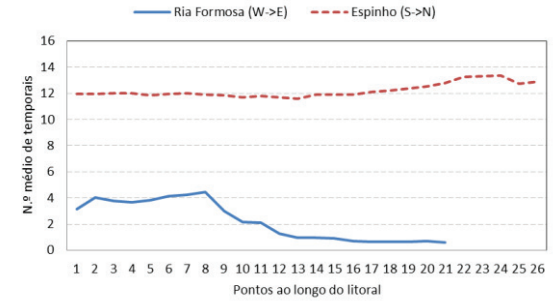


Fig. 5. Média anual de temporais marítimos ao longo dos trechos litorais de Espinho e da Ria Formosa.

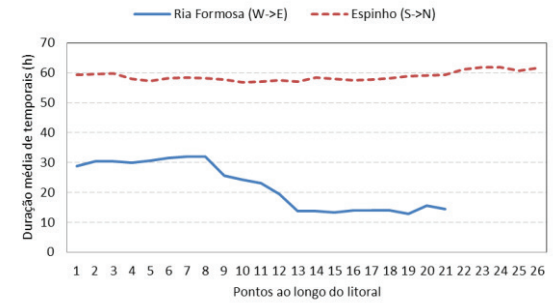


Fig. 6. Duração média (em horas) de temporais marítimos ao longo dos trechos litorais de Espinho e da Ria Formosa.

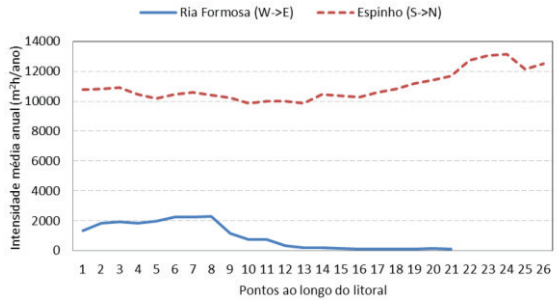


Fig. 7. Intensidade energética média anual em temporal marítimo, ao longo dos trechos litorais de Espinho e da Ria Formosa.

Tabela I. Valores anuais de vários indicadores da "intensidade" da agitação marítima (os resultados das 6 primeiras colunas são retirados do ONDATLAS).

	Hsmed (m)	Hs_84% (m)	Hs_max (m)	P_med (KW/m)	P_84% (KW/m)	Pmax (KW/m)	Is_med (m^2h)
Espinho	2.0	2.9	9.5	27	41	806	10963
Praia de Faro	0.8	1.6	6.4	8	10	284	1876
Armona	1.3	2.0	9.4	11	12	588	162

4. DISCUSSÃO

Costa *et al*. (2001), baseados em observações, referem um total anual de cerca de 10 dias de temporal marítimo ao largo de Faro (com $H_s > 3.5$m) e de 24 dias ao largo da Figueira da Foz (com $H_s > 4.5$ m). Pela conjugação do número médio de temporais por ano e da sua duração média, aqui encontram-se valores da ordem de 5 e 30 dias anuais de temporal marítimo nos litorais da Ria Formosa e de Espinho, respetivamente. Ou seja, obtém-se uma diferença significativa nos resultados para o trecho algarvio, tanto mais que os limites de início de tempestade são até superiores em Costa *et al*.

Na Tabela I apresentam-se os valores de alturas significativas e potências anuais (média, quantil 84% e máxima), calculados no ONDATLAS (INETI, 2003) para três localizações, e os valores aqui determinados da *IEMA*. Primeiramente, observa-se que os valores do ONDATLAS são inversos na relação de magnitudes a nascente e poente do Cabo de Sta. Maria em relação aos aqui calculados. Por outro lado, tomando a Potência como indicador, a relação dos valores médios ou do quantil 84% são da ordem de 1/3 a 1/4 do Algarve para Espinho, enquanto para o indicador *IEMA* a razão é entre 1/10 e 1/50 (a oeste e leste do Cabo de Sta. Maria).

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho analisou-se a intensidade energética em condições de temporal na zona costeira de Espinho e da Ria Formosa. Para tal, a partir de séries (de cerca de 55 anos) de *hindcast* ao largo dos dois locais de estudo, determinou-se a agitação marítima à profundidade de fecho em vários pontos da costa, e calculou-se a intensidade energética definida pela eq. (1).

Conclui-se que a intensidade média por temporal em Espinho é cerca de 2 a 5 vezes a calculada na Ria Formosa, sendo que nesta localização a intensidade a poente do Cabo de Sta. Maria é o dobro daquela a nascente. O número médio anual de temporais em Espinho e na Ria Formosa é também muito diferente, o que justifica que a intensidade energética média anual (*IEMA*) sob temporal marítimo seja da ordem de 1/10 entre a Ria Formosa e Espinho.

Este trabalho realça ainda a importância do indicador *IEMA* como substituto de outros parâmetros relacionados com a intensidade da agitação marítima, em metodologias de avaliação da vulnerabilidade e risco em zonas costeiras.

Agradecimentos

A participação do primeiro autor foi parcialmente financiada pelo projeto Co-ReSyf: "*This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 687289*".

REFERÊNCIAS

Beirão, A.S. (2015). *Avaliação e quantificação da intensidade da agitação marítima em Portugal Continental*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FCT, Univ. Nova de Lisboa.

Carvalho, M.M., Capitão, R. (1996). Valores extremos da agitação marítima na costa oeste de Portugal. *Recursos Hídricos*, Vol. 17, N.º 1.

Costa, M., R. Silva, Vitorino, J. (2001). Contribuição para o estudo do clima de agitação marítima na costa portuguesa. *2.as Jornadas Portuguesas de Eng. Costeira e Portuária*, AIPCN, 20p (CD-Rom).

Heitor, D.S. (2013). *Classificação da Intensidade Energética no Litoral de Espinho*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FCT, Universidade Nova de Lisboa, http://hdl.handle.net/10362/11977.

INETI (2003). ONDATLAS: Atlas de Ondas em Portugal, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, Lisbon.

Pontes M. T., Aguiar R., Oliveira-Pires H. (2005). The nearshore wave energy resource in Portugal, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 127(3), 249-255.

Sancho, F., Heitor, D.S. e Neves, M.G. (2013). Intensidade energética sob temporais marítimos: proposta de metodologia e aplicação ao litoral de Espinho. *8.as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, LNEC, PIANC Portugal, (Paper 15) 11 pp.

SWAN (2013). SWAN USER MANUAL, SWAN Cycle III version 40.91AB. Delft University of Technology.

Details of the Mediterranean Outflow Water propagation in the eastern Bartolomeu Dias Plateau (Gulf of Cadiz)

A. Jorge da Silva

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249 - 093 Lisboa, Portugal; jorge.silva@hidrografico.pt.

Abstract: From April to July 2014, current observations covered the whole water column at the transition from the Diogo Cão Trench to the Bartolomeu Dias Plateau, with emphasis on the surface 80 m and the bottom 250 m. Mediterranean Outflow Water reaching the Plateau from the Trench dominated the dynamics. Two current cores were present centred at 80 and 140 m above the bottom, with 30 cm/s average speed, current maxima above 40 cm/s and a tendency to strengthen from April to July. Superimposed on the mean current vector, 5-day oscillations with 10 cm/s amplitude were present, being particularly noticeable in the N-S current component. Clockwise-polarized inertial oscillations appeared ubiquitous just above the bottom layers, overriding the tidal currents, with amplitudes up to 10 cm/s.

Keywords: Mediterranean water, near-bottom flow, topographic steering, inertial oscillations, Bartolomeu Dias Plateau, Gulf of Cadiz.

1. INTRODUCTION

The excess of evaporation over precipitation in the Mediterranean Sea creates dense salty waters that are exported through the Straits of Gibraltar into the Gulf of Cadiz in a dense bottom current, while fresher water is advected at the surface into the Mediterranean. After passing the Straits, Mediterranean Waters (MW) sink, mix with surrounding waters, and decrease in density while adjusting hydrostatically. In its westward propagation along the slope, the flow splits in initially in two main cores, Upper and Lower, with a third Shallow core being separated further downstream (Âmbar and Howe, 1979).

In their review, Garcia et al. (2008) classify the Mediterranean Outflow Water (MOW) as an independent "contour current" flowing along the middle slope of the Gulf of Cadiz. They point to a furher division, near longitude 7º 20' W, of the Lower core in three branches – Intermediate, Principal and Southern – that rejoin near 8º 20' W, before leaving the Gulf of Cadiz. Between April and July 2014, current observations were performed within the path of propagation of the Intermediate branch of the Lower MW core of the MOW. Though the observations covered the whole water column, this communication will be focused on the details of the MOW.

2. DATA AND METHODS

Two moorings were deployed in the transition sector between the Diogo Cão Trench and the Bartolomeu Dias Plateau, over bottom depths of 769 m and 781 m below Mean Sea Level for, respectively, moorings 1 and 2 (Figure 1). RD Instruments LongRanger ADCPs were mounted looking up, 10 m above the bottom, and consistently returned valid data from 27, 16 m-thick, depth cells. This corresponded to an effectively observed water column from approximately 320 m down to within 34 m of the bottom. Within this bottom layer, no data were obtained because of the blanking distance associated with the configuration of the ADCPs.

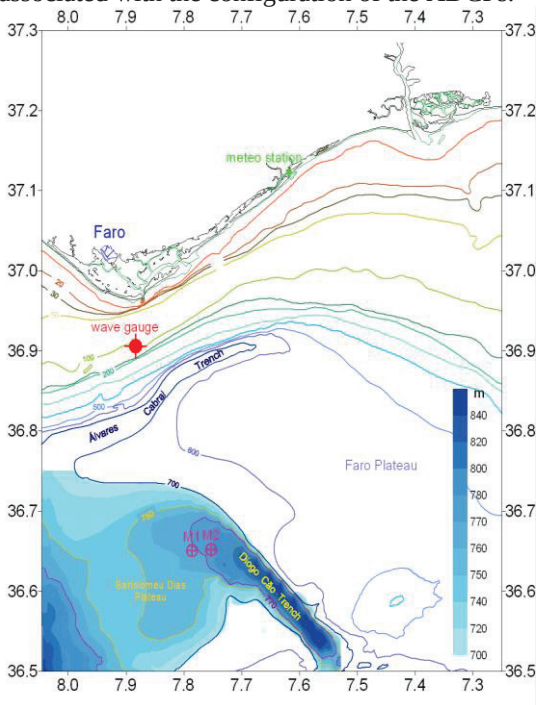


Fig. 1. Bottom topography and mooring locations.

Observations in mooring 2 extended from 13 April to 18 July (12 April – 12 June in mooring 1). A safety data download on 13 May caused a 14 h interruption of the data collection in both moorings.

Rotary spectral analysis (Gonella, 1972) conducted on the ADCP data revealed that the signals might be decomposed in three frequency domains: low-frequency (T > 1.5 d), "tidal" (2 h <T< 1 d) and high-frequency (T < 2 h). As the energy in the high-frequency domain was 2-3 orders of magnitude lower than in the other domains, the signals were first low-passed through an order 3 Butterworth filter at 2 h, prior to hourly decimation. Another order 3 Butterworth filter at 35 h was high- and low-passed through the decimated series for further analysis.

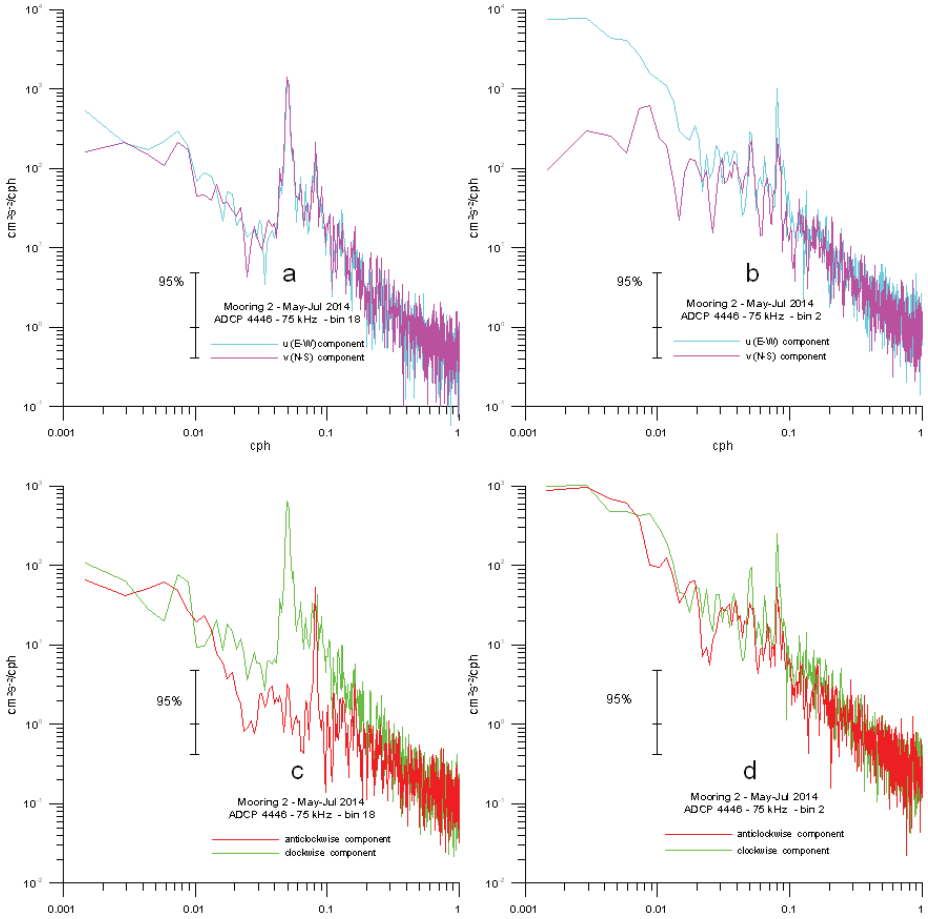


Fig. 2. Cartesian (a, b) and rotary (c, d) components spectra for cells 18 (left) and 2 (right) of the LongRanger ADCPs from Mooring 2. Notice the conspicuous energy peak in the clockwise component very close to 0.05 cpd at 480 m depth (cell 18). Also notice the difference between the spectra of the Cartesian components below 0.05 cpd at 730 m (cell 2).

3. RESULTS

Low-frequency dominated below 560-570 m, with oscillations taking place mainly in E-W direction (Figure 2b). Above, both frequency domains became of similar importance, with a conspicuous inertial peak at depths of 480-520 m (local inertial period 20.05 h). The interface is obvious in the low-frequency current signal (Figure 3) at about 550 m, separating the westward propagation of MOW from the much slower circulation of North Atlantic Central Water (NACW).

Several features appear conspicuous in the propagation of the MOW:

1. it was consistently toward WNW, with very few inversions;
2. with few exceptions, the velocities were above 25 cm/s;
3. its coherence seemed to increase steadily towards the end of the observation;
4. it was modulated by current pulses at time scales of 2-7 days, occasionally reaching 40 cm/s; and
5. it was formed of two cores, centred at approximately 600-650 and 700-730 m, most evident during the pulses (Figure 3).

The pulses were accompanied by a westward adjustment of the current, which became more northward when it slackened. This is rather clear in the spectra, that reveal a continuum of energy in the E-W component at frequencies below 0.02 cpd, and several energy peaks in the N-S component in the same frequency domain. Above the propagation layer of the MOW the (sub-tidal) current was week, typically below 5 cm/s.

Significant temperature rises occurred during the current pulses, with anomalies in excess of 1 ºC at the very beginning of the record and in May. However, in June-July, when the current was generally stronger, the temperature anomalies that

accompanied the pulses had smaller amplitudes, although the background level was not much different from what was observed in April-May (Figure 3).

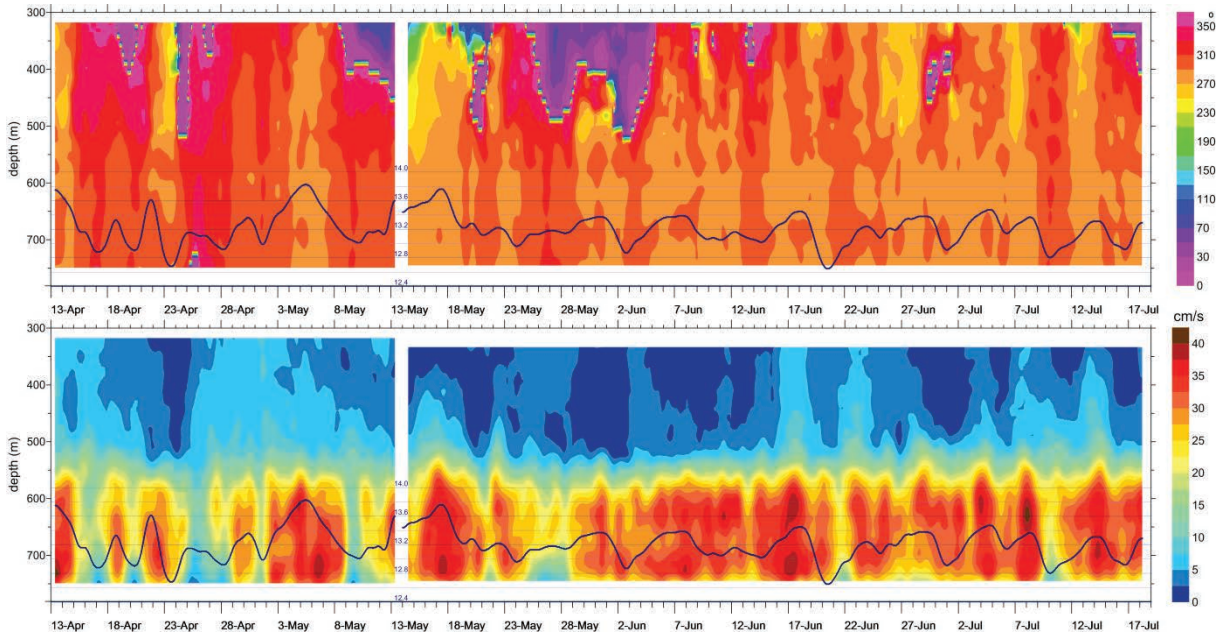


Fig. 3. 35-h low-passed temperature signal at the LongRanger ADCP overlapped on similarly filtered current direction and speed at Mooring 2 during the whole observation period.

At periods shorter than 1 day the current speeds were typically below 10 cm/s (Figure 4). As with the low-frequency current, one could identify a clear interface centred around 550 m, i.e. more or less coincident with the separation between NACW and MOW. It may be seen in the speed distribution as aregular alternating pattern around 5 cm/s below 550 m and a less regular pattern in the layer above, where longer time intervals occurred with current speed above 10 cm/s. The separation is better seen in the distribution of current direction (Figure 4) as a break in the vertical direction sequence and a change of the dominant cycle that appeared to be longer and "consistently" clockwise above the MOW, at least after 13 May.

Below 500-550 m, no consistent sense of rotation was observed and the current speed was typically below 5 cm/s. (Figure 4). On the other hand, above 450 m, 8 cycles may be seen from 17 to 23 May with a speed consistently above 5 cm/s, sometimes reaching 15 cm/s , corresponding to a typical period very close to 20 h. Between 6 and 11 June, 7 cycles may also be seen above 520 m, corresponding to an average period of 19.7 h. In both these cases the current vector rotated consistently clockwise in an sustained evidence of inertial motion.

4. DISCUSSION

Long time series of current measurements are not the rule in the Gulf of Cadiz, particularly with a high vertical resolution. Also, series covering the spring-summer transition are definitely not abundant. The present data set, therefore, is of very high value.

In 1971, an extensive observation was carried out of the middle slope of the Gulf of Cadiz, covering about one month in April-May (Gründlingh, 1981). It involved five CTD sections and seven current meter moorings with a vertical distribution focused on the MOW. The study revealed a solitary increase in temperature of ca. 1 ºC over 2-4 days, interpreted as due to a thickening of the MO and an increase in volume transport. The event was traced back to Gibraltar from where it propagated at 16 cm/s.

It is tempting to determine phase speeds through the connection of the observed current pulses between the two moorings of the present study. When doing so, one obtained a speed very close to the one found by Gründlingh (1981). However, the short distance between the two moorings renders this estimation quite uncertain. Assuming that this phase speed holds for all the events, they were tentatively tracked to some forcing episodes occurring 16 days before in the Straits. For that purpose, atmospheric pressure differences between the Sea of Alboran and the Gulf of Cadiz were derived from the analyses of the model of the European Centre for Mid-Term Weather Forecast. The comparison showed that it was indeed possible to relate positive differences with the current pulses and negative differences with current slackening. On the other hand, the comparison with wind revealed inconclusive.

The ubiquity of inertial oscillations just above the MOW also deserved some attention. Any perturbation may trigger inertial motion, the typical example being a sudden increase in the wind blowing over the sea surface. The inertial oscillations will then tend to decay if further

perturbations do not occur. A significant increase in the low-frequency current speed from 25 cm/s to more than 35 cm/s occurred on 15-16 May in the depth interval 550-750 m, with a 5-15 cm/s increase at 500 m (Figure 3). This may have been the trigger of the inertial oscillations detected between 17 and 23 May. Similarly, the set of 7 cycles with an average period of 19.7 h and speed between 5 and 10 cm/s, observed in the depth interval 400-550 m at 6-11 June may have been triggered by the increase in the MOW that occurred on 4-5 June.

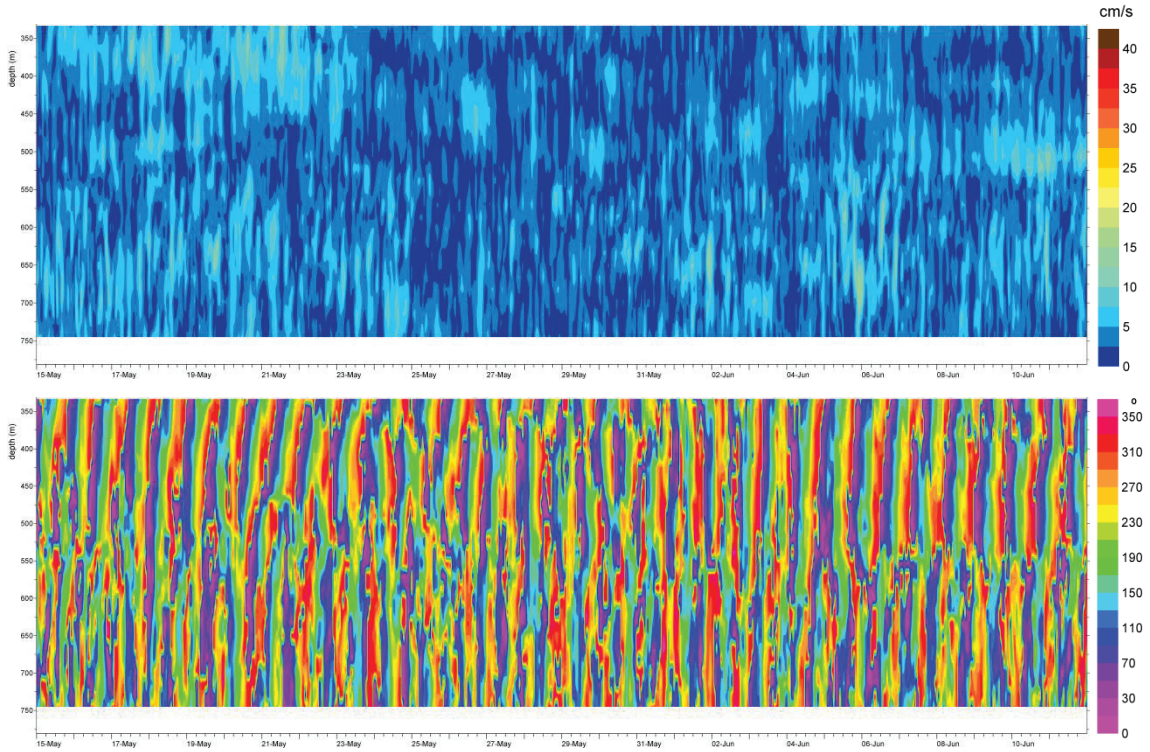


Fig. 4. Mooring 2: Detail of the time series of the vertical structure of the 2-35 h band-passed current speed and direction.

5. CONCLUSIONS

The current observations performed in the Bartolomeu Dias Plateau, in the vicinity of the head of the Diogo Cão Trench, in April-July 2014 revealed a dynamics completely dominated by the flow of Mediterranean Water, taking place below 550 m depth, i.e. within 250 m of the bottom. Mean current speeds of the order 30 cm/s, with maxima above 40 cm/s, comprised two current cores, centred at about 80 m and 130-150 m of the bottom.

Two frequency domains were identified for the current fluctuations in this bottom layer. The low frequency (T > 35 h) dominated, with 5 days oscillations mostly in the N-S current component. At periods shorter than 1 day, inertial oscillations were

most relevant, with speeds easily reaching 10 cm/s. Indications were obtained of an increasing trend in the velocity in the lower layer from April to July, the meaning of it having not been explored.

Acknowledgments

Thanks are due to Repsol for agreeing with the use of the data.

REFERENCES

Ambar, I., Howe, M.R. (1979) Observations of the Mediterranean outflow I. Mixing in the Mediterranean outflow. *Deep-Sea Research*, **26A**, 535–554.

García, M., Hernández-Molina F.J., Llave E., Stow D.A.V., León R., Fernández-Puga M.C., Diaz del Río V. and Somoza L. (2008) Contourite erosive features caused by the Mediterranean Outflow Water in the Gulf of Cadiz: Quaternary tectonic and oceanographic implications, *Marine Geology*, **257**, 24-40.

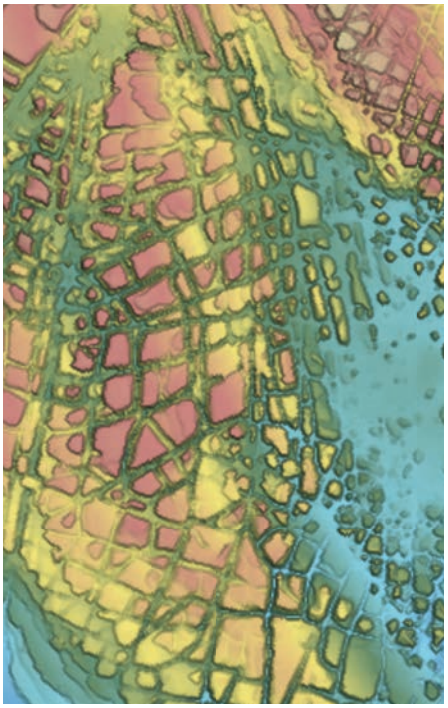
Gonella, J. (1972) A rotary-component method for analysing meteorological and oceanographic vector time series, *Deep-Sea Research*, **19**, 833-846.

Grundlingh, M.L. (1981) On the observation of a solitary event in the Mediterranean Outflow west of Gibraltar. *Meteor Forschung-Ergebnisse*, **23**, 15-46.

OCEANOGRAFIA GEOLÓGICA

4as JORNADAS DE ENGENHARIA HIDROGRÁFICA

21, 22 E 23 DE JUNHO DE 2016



Estudo da dinâmica sedimentar no troço costeiro entre o Cabo Mondego e a praia da Leirosa

C. Ferreira (1), P. Silva (1), C. Coelho (2) P. Baptista (1) e A. Bouzas (1)

(1) CESAM & Universidade de Aveiro. carolineferreira@ua.pt.

(2) RISCO & Universidade de Aveiro.

Resumo: Os processos morfodinâmicos apresentam uma complexidade significativa na zona costeira. O seu estudo e conhecimento aprofundado são essenciais para a compreensão da dinâmica sedimentar e para a valorização e conservação de um sector costeiro. As condições de navegabilidade na embocadura de um porto marítimo constituem um exemplo da interação entre parâmetros morfológicos e hidrodinâmicos. O porto da Figueira da Foz é um destes casos: para condições de agitação marítima energética (tempestades) este sistema é afectado pela acreção de sedimentos na barra submersa junto ao molhe norte. O objectivo deste trabalho foi caracterizar a dinâmica sedimentar no trecho costeiro entre o Cabo Mondego e a praia da Leirosa, através da monitorização de parâmetros físicos e da aplicação de um modelo numérico morfodinâmico para a região.

Palavras-chave: dinâmica sedimentar, morfodinâmica, modelação, Delft3D, Figueira da Foz.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Andrade e Freitas (2002) a faixa costeira oeste portuguesa é caracterizada por um regime de ondulação muito energético e dominado pela direcção NO. Deste modo, grande parte da energia que é libertada na rebentação favorece uma deriva litoral intensa, que em termos médios se processa de norte para sul. A deriva litoral é interrompida, para determinados regimes de agitação, em obstáculos naturais, como se verifica em alguns promontórios, ou em obras costeiras como os molhes ou esporões.

A área em estudo localiza-se entre o Cabo Mondego e a praia da Leirosa, que inclui o porto da Figueira da Foz, localizado na foz do rio Mondego (Figura 1). Este porto comunica com o oceano através de um canal de navegação que foi fixado por dois molhes convergentes em 1962. Com a finalização da obra em 1965, verificou-se uma grande alteração na morfologia da zona costeira envolvente à embocadura. Nas praias a norte observou-se um avanço significativo da linha de costa, resultante da acumulação de sedimentos transportados longitudinalmente de encontro ao molhe norte, e provenientes de norte do Cabo Mondego. Contrariamente a sul da embocadura verificou-se um recuo considerável da linha de costa (Dias *et al.*, 1994).

De forma a minorar os problemas que afetavam as condições de navegabilidade na embocadura, nomeadamente resultantes do assoreamento da barra, o molhe norte foi prolongado em 400 metros entre 2008 e 2010. Após a obra, os problemas de acreção persistiram, sendo necessária a realização de dragagens de modo a facilitar o acesso dos navios às instalações portuárias.

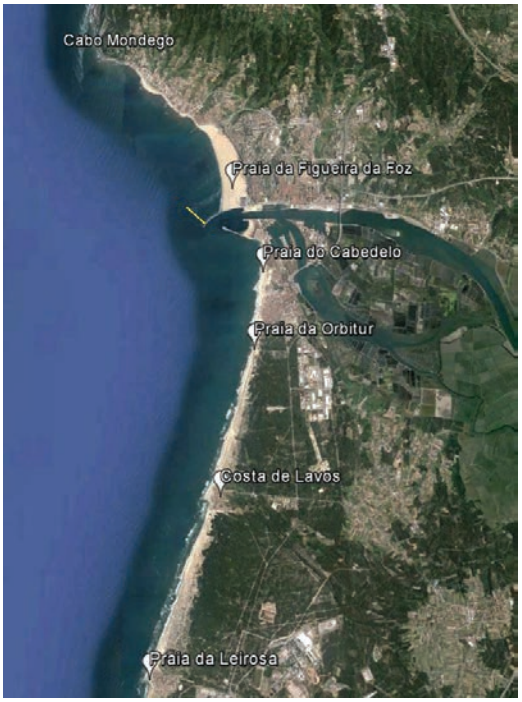


Fig. 1. Área de estudo e localização das praias onde foram efectuadas as campanhas de campo, secção 4 a amarelo (GoogleEarth).

2. DADOS

2.1. Campanhas de Campo

Procedeu-se à aquisição de dados hidrodinâmicos da agitação marítima (elevação da superfície livre da água e correntes) e da concentração de sedimentos em suspensão durante um ciclo de maré, (Universidade de Aveiro, 2015. Estes dados foram utilizados para estimar a deriva litoral e validar os resultados do modelo numérico desenvolvido.

A primeira campanha realizou-se entre 5 e 9 de novembro de 2014 e a segunda entre 21 e 24 de maio de 2015. As campanhas decorreram em regimes de agitação distintos: na campanha de novembro encontrávamo-nos perante regime de inverno (H_s=4.5m e T_p=10-14s) e em maio de verão marítimo (H_s=2m e T_p=7-11s). A partir das medições da concentração de sedimentos em suspensão (OBS), posteriormente calibrados com areia local em laboratório (Carrilho, 2013), e da corrente (ECM) estimou-se as componentes do caudal sólido instantâneo em suspensão longitudinal e transversalmente (q_{sx} e q_{sy}, respectivamente) de acordo com as seguintes equações:

$$q_{sx} = \int_{z_0}^{h} V_x(z,t)C(z,t)dz;$$

$$q_{sy} = \int_{z_0}^{h} V_y(z,t)C(z,t)dz$$

onde x e y representam, respetivamente, os eixos coordenados nas direcções longitudinal e transversal da praia, *h* representa a altura da coluna de água, z_0 corresponde ao nível acima do fundo onde o valor da velocidade do escoamento é nulo, *V* a velocidade do escoamento e C a concentração de sedimentos.

2.2. Modelação

A componente de modelação foi baseada no modelo Delft3D desenvolvido pela Deltares (Holanda). Neste trabalho foram utilizados quatro módulos deste modelo: FLOW, WAVE, MOR e SED. O primeiro módulo simula os fluxos bidimensionais (integrados na vertical) ou tridimensionais e fenómenos de transporte resultantes da maré ou de forçamento meteorológico numa grelha retilínea ou curvilínea (Deltares, 2011a e 2011b). O segundo é baseado no modelo de terceira geração SWAN (*Simulation WAves Nearshore*), (Deltares, 2011b). As taxas de transporte sedimentar no modelo (Delft3D-SED) são avaliadas como a soma de duas contribuições, o transporte em suspensão e por arrastamento. A equação do balanço de massa no módulo Delft3D-MOR calcula as variações da batimetria em função dos gradientes das taxas de transporte sedimentar.

Para a implementação do modelo foram desenvolvidas duas grelhas numéricas (A e B) de forma a introduzir a batimetria numérica necessária ao modelo (Figura 2). A malha A é regular com uma resolução de 200m e a malha B é curvilínea com uma resolução variável entre 300m ao largo e de 20m na embocadura e interior do estuário. A propagação da agitação foi efectuada nas duas malhas e o escoamento médio (maré) e o cálculo das taxas de transporte na malha B.

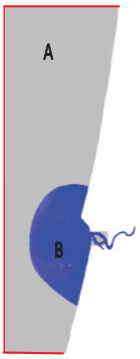


Fig. 2. Malha numérica A e B (domínio pai e filho, respetivamente e fronteira aberta (linha vermelha).

3. RESULTADOS

3.1. Campanhas de Campo

Os valores de q_{sx} e q_{sy} calculados foram integrados no período de tempo das medições obtendo-se os valores do caudal sólido médio (m^2/s). Assumindo que a extensão do perfil de praia ativo é fixa e extrapolando os valores obtidos durante as medições para um ano, estimou-se a taxa de transporte longitudinal anual (m^3/ano). Estes valores são calculados assumindo que só representam as condições em que foram medidos.

Tabela 1. Caudal sólido na direção longitudinal (Q_x) e transversal (Q_y) e taxa de transporte longitudinal anual Q_x (anual).

		Q_x m^2/s ($x10^{-4}$)	Q_y m^2/s ($x10^{-4}$)	$Q_{x(anual)}$ m^3/ano ($x10^6$)
7/11/2014	Cabedelo	0.86	0.67	0.27
9/11/2014	Leirosa	2.99	0.087	0.95
21/5/2015	Orbitur	1.31	0.009	0.41

Na campanha de novembro observa-se, em geral, um aumento da taxa de transporte longitudinal desde a praia do Cabedelo para a praia da Leirosa. No entanto os valores calculados podem estar subestimados, uma vez que a localização dos sensores não permitiu medir as condições em toda a largura da zona de rebentação. Na campanha de maio, de acordo com a agitação marítima incidente, a taxa de transporte diminui. De acordo com Silva *et al.*, 2012, a variabilidade interanual do transporte varia entre 0.108 – 2.24x$10^6$$m^3$/ano.

3.2. Simulações numéricas

A validação do modelo foi efectuada através da comparação de resultados numéricos com dados observados tanto na componente hidrodinâmica, como na morfodinâmica. Na componente hidrodinâmica da agitação marítima do modelo foi calculada a altura significativa da onda para os dias das campanhas e feita a comparação com dados observados (Figura 3).

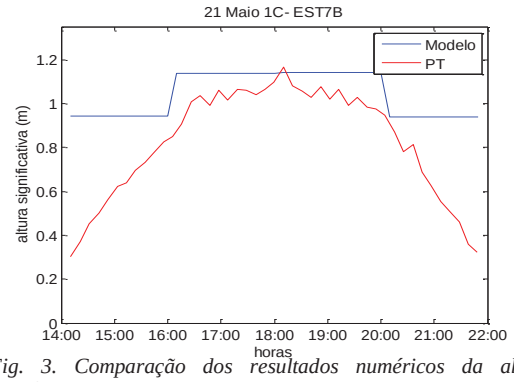


Fig. 3. Comparação dos resultados numéricos da altura significativa da onda (linha azul) com as medições (linha a vermelho) ao longo do tempo, nos pontos de amostragem para a campanha de maio de 2015.

Para validação da variação morfológica calculou-se a variação da batimetria na embocadura do porto durante o temporal ocorrido entre 11 e 19 de dezembro de 2012, obtendo-se os resultados da Figura 4 (direita). Verifica-se que os valores simulados reproduzem a acreção de sedimento na barra submersa, com valores na ordem de grandeza dos observados (valores máximos de 3 metros). Observam-se variações na batimetria superiores a 4m junto aos molhes, isto pode dever-se ao facto de a batimetria junto a estes locais, bem como junto à costa não serem as mais adequadas, podendo gerar erros consideráveis nestes sectores.

De forma a estudar a propagação da ondulação e da deriva litoral na zona de estudo considerou-se o regime de ondulação equivalente anual estabelecido por Barata *et al*. (1996), representado na Tabela 2.

Este conjunto de ondas correspondente ao regime de ondulação equivalente foi considerado de modo a caracterizar a propagação da onda na região em estudo em condições de agitação médias e extremas. Para as condições de onda W3 e W6 (de igual valor de Hs mas rumos distintos), verifica-se que na primeira há uma redução significativa de Hs do Cabo Mondego para a praia da Figueira (Figura 5, esquerda), gerando uma zona de sombra. Para a onda W6 (Figura 5 direita), com direção de Oeste, os valores de Hs superiores atingem menores profundidades ao longo de todo o setor quando comparado com a onda W3.

Tabela 2. Ondas representativas do clima de agitação equivalente.

Onda	W1	W2	W3	W4	W5	W6
Hs (m)	1.75	2.25	3.75	4.75	6.25	3.75
Tp (s)	12	12	12	15	15	12
Dir (º)	315	303.75	326.25	315	315	281.25
Freq (%)	50	30.02	9.80	1.64	1	7.54

Para avaliar os fluxos sedimentares entre o Cabo Mondego e a praia da Leirosa, selecionaram-se 5 secções ao longo desse sector (Universidade de Aveiro, 2015), em que foram calculados fluxos totais ao longo de diferentes secções de controlo para as diferentes condições de onda.

A Figura 6 representa a taxa de transporte líquido ponderado por cada onda em suspensão, por arrastamento e o total na secção 4,entre os 6 e 10m de profundidade, aproximadamente (Figura1). Verifica-se que o transporte por arrastamento para todas as condições de onda é de sul para norte, uma vez que este se processa na direção de propagação da onda, e aumenta com a altura da onda ao largo. A componente do transporte em suspensão para todas as condições de onda processa-se de norte para sul (valor médio de $0.186x10^6 m^3$/ano) sendo que as maiores contribuições ocorrem nas condições W5 ($0.131x10^6 m^3$/ano), W6 ($0.24x10^5 m^3$/ano) e W4 ($0.22x10^5 m^3$/ano), respetivamente. Os sedimentos que transpõem o molhe de norte para sul têm origem na deriva litoral da praia da Figueira da Foz. Verifica-se que a condição de onda W5 promove um transporte total de norte para sul através do molhe.

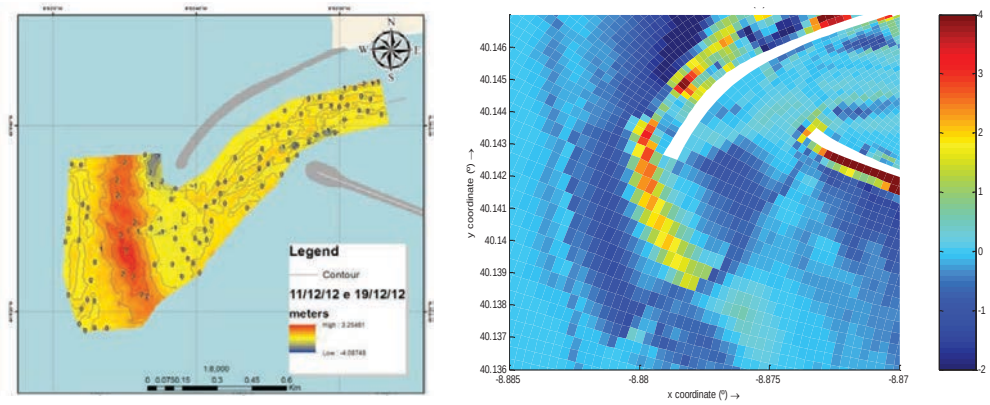


Fig. 4. Variação da batimetria entre 11 a 19 de dezembro de 2012 para valores observados (esquerda) fornecidos pela Administração do Porto da Figueira da Foz e simulados (direita).

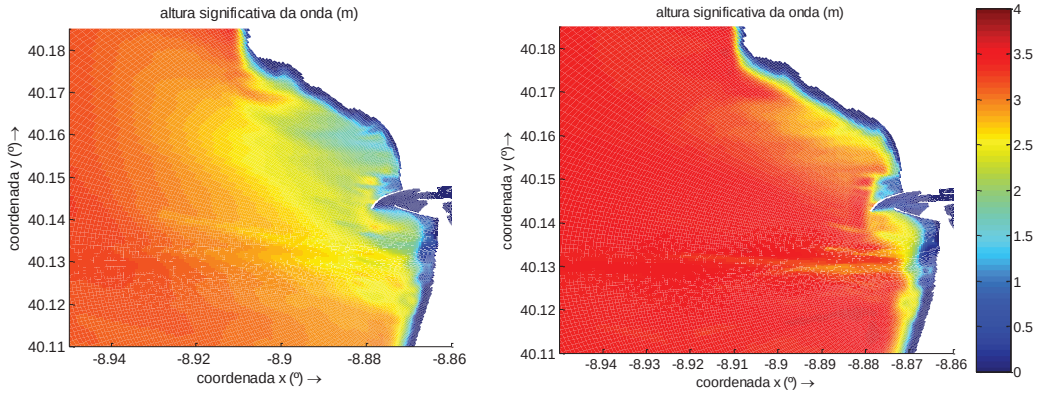


Fig. 5. Distribuição espacial da altura significativa da onda para as condições de simulação W3 (esquerda) e W6 (direita), (ver Tabela2).

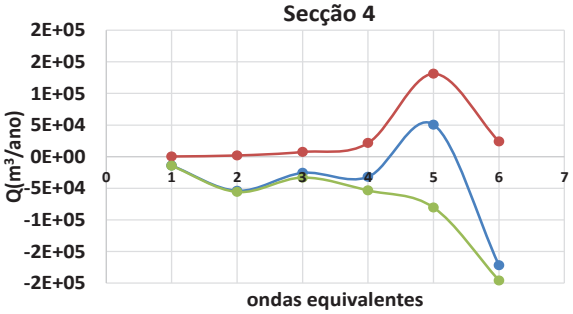


Fig. 6. Taxa de transporte líquido ponderado (m^3/ano), total (linha azul), por arrastamento (linha verde) e por suspensão (linha vermelha) para todas as ondas equivalentes (secção 4).

4. CONCLUSÕES

As campanhas de monitorização tiveram como intuito estimar as alturas significativas da onda, quantificar a corrente litoral e os valores do transporte sólido, importantes na validação do modelo numérico e compreensão da dinâmica sedimentar associada. Os resultados obtidos podem ser representativos do comportamento local, no entanto devem ser avaliados com precaução, uma vez que estão a ser extrapolados resultados de um ponto para toda a coluna de água e setor.

As estimativas da taxa de transporte efetuadas na praia do parque de campismo da Orbitur (maio de 2015) variaram entre 0.13 – 0.41x$10^6$$m^3$/ano para as condições de agitação: H_s=2m, T_p=7-11s e rumo entre NO-NNO, aproximadamente. Estes resultados são coerentes com os valores simulados, para as condições de onda 1 e 2 (semelhantes às condições da campanha) tendo o transporte variado entre 0.11-0.44x$10^6$$m^3$/ano.

O fluxo sedimentar através do molhe norte processa-se devido ao transporte por arrastamento e em suspensão, sendo este último de norte para sul para todas as condições de onda consideradas e significativo em condições de temporal (onda W5). Os resultados sugerem que estas condições de temporal favorecem a acreção da barra submersa, na embocadura do porto.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Administração do Porto da Figueira da Foz a cedência dos dados.

REFERÊNCIAS

Andrade, C., Freitas, M. C. (2002). Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adaptation Measures, SIAM Project. Gradiva. 173-219 pp.

Barata, C., Freitas, M. C. (1996). Selecção de Ondas Representativas da Agitação Marítima para efeito da avaliação do transporte litoral na costa de Aveiro. *Recursos Hídricos*, 17, 43-74.

Carrilho, A. (2013). Morfodinâmica e transporte sedimentar longitudinal na Praia de Mira; Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 31-33pp.

Deltares (2011a). Delft3D-Flow User Manual. 7 e 323pp.

Deltares (2011b). Delft3D-Wave User Manual. 7 e 323pp.

Dias, J.A., Ferreira, O., Pereira, A.R. (1994). Estudo sintético de diagnóstico da geomorfologia e da dinâmica sedimentar dos troços costeiros entre Espinho e Nazaré. Edição electrónica de 2005: w3.ualg.pt/~jdias/JAD/ebooks.

Pereira, C., Coelho, C., Bouzas, A. F., Ferreira C., Dias, J., Vaz, N., Silva, P., Pinto, A.. Bernardes, C., Terres, L., Pinheiro, L., Baptista, P., e Abreu, T. (2015). Estudo da dinâmica sedimentar na embocadura da barra do porto da Figueira da Foz. Relatório Final. Universidade de Aveiro, 193pp.

A first approach to numerical modelling of the Douro estuarine dynamics using Delft3D freeware modelling suite

A.I. Santos (1, 2), A. Oliveira (1), J. P. Pinto (1) and M. C. Freitas (2)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa, Portugal, ana.santos@hidrografico.pt.

(2) IDL, Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal.

Abstract: In order to quantify and qualify the effective sediment exchanges between the Douro estuary and the continental shelf, as well as determining the fate of these sediments and consequent implications on coastal management issues, numerical modelling must be applied to simulate non-observed scenarios during field surveys. With this objective in mind, the freeware modelling suite Delft3D was compiled and implemented at IH-PT, in order to make a first approach numerical simulation of the Douro estuarine dynamics, and validate the model with field data collected in 2005 (ECOIS project), showing a generally good representation of estuarine hydrodynamics.

Key words: estuaries, sediment transport, modelling, Delft3D, Douro river.

1. INTRODUCTION

Determining effective sediment exchanges between estuaries and inner shelf/coastal environments entails the availability of detailed sets of data, covering a wide range of seasonal forcing scenarios. In this context, numerical modelling suites provide powerful tools that complement field data, enabling the simulation of non-observed scenarios. Several modelling approaches have already been applied to the Douro estuary sediment dynamics (eg. Almeida et al, 2015), however, the availability of the ECOIS datasets collected between 2005 and 2007 (ECOIS, 2008) represent an excellent opportunity to readdress this subject, in order to better understand this complex phenomenon. In this work the first steps given at Instituto Hidrográfico (IH-PT) to compile and implement the Delft3D modelling suite are described as well as a first approach to run the FLOW and SED models on a simplified domain representing the Douro estuary.

2. METHOD

The scenario observed during the ECOIS reference state survey (September 2005 – low runoff summer conditions) defined the forcing conditions on a simplified bathymetry of the Douro Estuary. The results of the Delft3D FLOW and SED simulations were then compared with field data.

2.1. The Delft3D Modelling Suite

Delft3D is an integrated modeling suite, which simulates two-dimensional and three-dimensional flow, sediment transport and morphology, waves, water quality and ecology and the interactions between these processes. The suite is mostly used for the modelling of natural environments like coastal, river and estuarine areas, but it is equally suitable for more artificial environments like harbors, locks, etc. The Delft3D suite is divided into several inter-dependent modules. The FLOW module is a multi-dimensional (2D or 3D) hydrodynamic and transport simulation program. It calculates non-steady flow and transport phenomena that result from tidal and meteorological forcing on a rectilinear or a curvilinear boundary fitted grid. The hydrodynamic conditions (velocities, water elevations, density, salinity, vertical eddy viscosity and vertical eddy diffusivity) calculated in the Delft3D - FLOW are used as input to the other Delft3D modules, namely: Delft3D-WAVE for short wave propagation, and Delft3D-SED for cohesive and non-cohesive sediment transport. For morphodynamic simulations the hydrodynamic module is integrated with the wave module and a sedimentation and erosion module into the Delft3D-MOR module. Since 2011, Deltares distributes Delft3D software as open source software after 13 years of licensing. The source code compilation process is explained at the Deltares Open Source Community Portal (http://oss.deltares.nl/).

2.2. Building the domain

The applications RGFGRID and QUICKIN (Delft3D) were used to generate the curvilinear grid, and schematize the bathymetry files which served as base for the model runs. For this purpose, land boundary polylines were digitized from Google Earth satellite imagery and a high resolution bathymetry dataset collected in 2006 for the ECOIS project was used. The dataset covers the whole Douro Estuary up to the Crestuma dam, located some 22 km upstream from the estuary mouth, not covering the outer modelling domain. The various options available on QUICKIN were used to construct a hypothetical bathymetric configuration of the outer domain.

Presently, the upstream limit of the Douro Estuary is artificially set by the Crestuma dam. This was also taken in consideration when defining the upstream limit of the domain. The effect of this physical artificial barrier was simulated using a "thin dam". To simulate the Crestuma dam discharge, a "discharge" point was defined in an adjacent grid cell. Model computational results were monitored as a function of time by using "observation points". In this domain, three observation points were defined using QUICKIN, one at each end of the domain and one in the estuary mouth, which will be used to compare with the field data.

2.3. Model Runs

The model runs' time step is generally chosen based on accuracy arguments and Deltares claims that in most cases stability is not an issue. This was not the experience of the "Douro" Estuary simulations, so the time step was set to 1 minute, or 0.5 minutes when the 1 minute time step led to unstable solutions and simulations stopped.

In the "Douro" estuary simulations, the parameters salinity, temperature and sediment were activated. These will be taken into account including their influence on the water density. The sediment dynamics inside the Douro Estuary is a complex and important phenomenon. ECOIS data revealed that Douro bottom sediments are made up of very coarse material with a mean mode of 0.0690 mm, but with a significant fine sediment component (fine fraction 0-80%). Suspended sediment grain size revealed a mean size of about 15 µm, revealing that this fine fraction is in constant transit inside the estuary. Given this knowledge the transit of fine cohesive sediment (SedimentMud) is simulated having as its source the Douro discharge in the Crestuma Dam. Initial condition values for these parameters were adopted based on field data, although the real estuary shows a high variability in these values, especially during neaps, where density values are highly variable in the longitudinal extent of the domain as well as in the vertical structure of the water column. In this work, uniform initial conditions of water level (WL=0), salinity (S= 20), temperature (T=18˚C) and sediment concentrations (Conc=3 kg/m^3) were assumed for the first run. In the subsequent runs, restart files from the previous run were used.

For all model runs, and given that Douro estuarine dynamics is highly affected by vertical density and velocity stratification, a 3D modelling approach was used, simulating a five equidistant σ layers.

The conditions defined at the open boundaries represent the influence of the area beyond the model domain. The choice of the type of boundary condition used depends on the phenomena to be studied. In the case of the "Douro" Estuary, it is known from ECOIS data that estuarine hydrodynamic is mainly forced by two factors: tide and the river flow, therefore, an open boundary was defined at the offshore limit of the domain with the type "water level", with flow conditions set to astronomical. The astronomic components M2 (Principal lunar semidiurnal), S2 (Principal solar semidiurnal), K1 and O1 (Lunar diurnal) were defined in the flow conditions according to the values provided by the official tidal chart for the Porto of Leixões (approximately 5 km north of the Douro outlet). No open boundaries were defined on the upstream limit of the domain.

A discharge point was defined adjacent to the Crestuma thin dam to simulate dam discharges. To define the discharge data, the values of effluent flow at the Crestuma dam (available at http://snirh.pt/) for the month of September 2005 were used. Typical values of salinity and temperature of the river Douro were used to establish these discharge conditions. Sediment concentration values in the hydrological stations observed during the ECOIS surveys were very low (≈2.5-7.5 kg/m^3), and in the absence of further information or monitoring points along the river, upstream from the modelling domain, the constant value of 10 kg/m^3 was assumed for the September 2005seasonal scenario.

For the six simulations presented in this work, forcing conditions into the "Douro" estuary domain were established at the sea open boundary and at the Crestuma discharge position. The model runs covered the whole month of September 2005 up to the 2nd of October 2005. Two different forcing conditions were imposed on the Crestuma discharge. The first set of runs used daily effluent flow and the second set used hourly effluent flow. Real Crestuma flow values were used to impose discharge conditions in both cases. The reason behind choosing the two sets of Crestuma flow values is illustrated on Fig. 2. Mean daily flows are calculated using the sum of hourly flows (which are in most cases zero) and averaging them throughout the 24-hour period, resulting in low continuous flows; however the reality is that discharges at the Crestuma dam are highly artificialized and occur in short and high value bursts of flow into the Douro estuary, having a drastic impact on estuarine dynamics over a short period of time. This had already been observed during the ECOIS field surveys and the two sets of model runs attempt to analyse the differences between imposing two sets of real data into the same mathematical model.

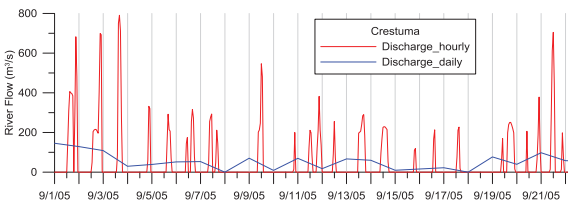


Fig. 2. Crestuma effluent flow values (snirh.pt), hourly (red) versus mean daily (blue).

3. RESULTS AND DISCUSSION

For the purpose of model validation, FLOW run results collected at the "outlet" monitoring point were compared with in-situ data collected during the ECOIS 2005 survey, at "real life" equivalent location. During the ECOIS survey a mooring (Cantareira) was deployed containing two current meters: one 600 kHz ADCP looking upwards, covering the current structure of the whole water column except for the first ≈1.5 meters above bottom and an acoustic single point current meter coupled with salinity and temperature sensors to collect data near bottom.

3.1 Water level

At the "outlet" monitoring point, water levels were accurately represented by the model, although tidal phase discrepancies appear throughout the time series. These discrepancies are not constant. During the first neap tide period (Run2, Sep.1-12th), tidal simulation phases are ahead of field data for approximately one hour, however, during spring tides (simulation Run3, Sep. 18-20th), model and field data seem to be almost in sync. In the following neap tide period (Sep. 27-29th), model simulations are behind field data for approximately 1.5 hours. The progression of these discrepancies seem to represent a gradual lagging of model simulation's tidal evolution when compared with field data; in other words, real tidal evolution inside the estuary seems to be faster than the one reproduced by model runs. The reason behind these discrepancies may be found in three factors. First, the bathymetric differences between the real Douro estuary measured in the field data and the simplification of the "Douro" estuary reproduced by the model, especially in the offshore part of the domain, where the water level boundary is generated. The second one is tied to the open boundary definition itself. As previously mentioned, the harmonic constituents were taken from the official tidal chart for the Porto de Leixões, an open ocean harbor, some 4 km north of the estuary mouth. The tidal chart itself contains elements that show that tidal levels inside the Douro should be corrected when compared to the Leixões water levels, explaining some of the initial discrepancies between the model simulations and real time data. Thirdly, the over simplification of the bottom sediment coverage of the estuary domain will probably result in significant differences between the real bottom friction acting on the estuary flow and the model simulation.

3.2 Currents

Current velocities simulated by the model are in the same order of magnitude than those measured in the field, especially during spring tides. However, model runs do not accurately reproduce the current asymmetry between floods and ebbs which is especially evident in the bottom field data. During neaps, model representation of the current structure inside the estuary is poor in magnitude and in tidal phase, as it was previously mentioned for the water level series. Hourly simulations clearly represent the effect of the Crestuma short discharges on estuary current structure, not present in the daily simulations. It is not clear from ADCP data if this effect is real at this point of the estuary.

3.3 Salinity and temperature

As it was the case with water level and currents, bottom salinity and temperature are better represented during spring tide periods than during neaps. Value fluctuations in the model runs are sharper than in reality, although tidal fluctuations are well reproduced. This discrepancy between real and simulated values probably owes to the initial conditions set for the model runs. As it was mentioned, uniform temperature and salinities were assumed for the beginning of simulations. It is known from ECOIS data that this is not the case for the Douro estuary. Sharp longitudinal and vertical density gradients are present in the estuary throughout the tidal cycle, especially during neaps (Fig. 3).

3.4 Suspended sediments

Although no quantitative relation could be established between model suspended sediment load and field data, a very good agreement was found between near bottom model SedimentMud concentrations and ADCP echo intensity data for the same period (Fig. 3).

4. FINAL REMARKS

A simple first approach model simulation of the "Douro" estuary using Delft3D FLOW and SED modules satisfactorily reproduced a general picture of estuarine hydro and sediment dynamics, especially during spring tide periods when water column stratification is not as significant as during neaps. The results showed that the chosen five vertical σ layer domain is not enough to accurately simulate the longitudinal and vertical complexity of the Douro estuary, resulting in poorer simulation performances when the domain is vertically stratified.

Concerning future work, a lot is yet to be done to have a trustworthy representation of the real Douro estuary namely:

-Bathymetry: further efforts should be made to include real high resolution bathymetrical data in the offshore part of the domain. The better representation of this part of the model domain will improve the water level and tidal current model results, as well as allowing the forcing of the model domain with waves;

-Vertical structure of the water column: the five σ layer vertical resolution of the water column adopted

during this exercise did not accurately represent the complexity of the Douro dynamics. ECOIS data has shown that the vertical structure of the current is a key factor in determining whether or not sediment is exported from the estuary into the continental shelf, thus special attention should be given to this particular issue, given the main objective of this work;

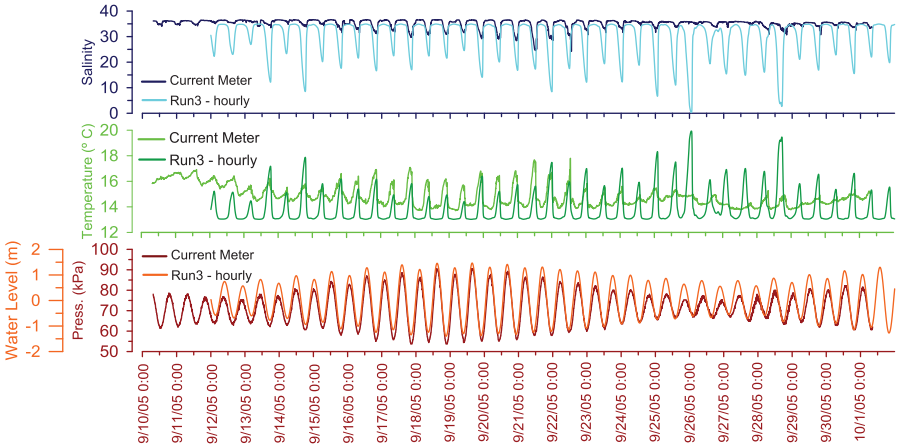


Fig. 3. Salinity (top), temperature (middle) and water level (bottom) series measured at the Cantareira bottom RCM9 (acoustic current meter) and Run3 hourly simulations.

-Waves: given the known highly energetic wave regime of the NW Iberian shelf, the inclusion of WAVE simulations in Delft3D, should reveal key issues in the fate of estuarine exports on the continental shelf, especially during winter/high regime simulations;

-Initial conditions: The initial conditions set for the model runs should better reflect the real conditions measured in the Douro estuary during field surveys. This exercise revealed that setting the initial conditions to uniform values will result in a poor representation of the estuary's density structure. Efforts should be developed in order to prepare non-uniform salinity, temperature and sediment (bottom sediments and suspended loads) initial conditions input files. According to Deltares this is possible using the application QUICKIN.

Acknowledgements

This work was a part of the Advanced Studies Course for the PhD Programme in Geology, Faculdade de Ciências-Universidade de Lisboa.

REFERENCES

The following references were used for this work, which in most cases are not individually referenced for the sake of text simplicity:

Almeida, J.; Pinho, J.L.S.; Venâncio, S.S.;Vieira, J.M.P. (2015). "Avaliação do transporte sedimentar no estuário do Rio Douro em diferentes cenários hidrodinâmicos". *VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, Aveiro.

Delft3D Basic Course – Block 1 Hydrodynamic modelling in Delft3D, 22-23 June 2015. Deltares Academy Course Material Version 4.00.33026, 15 June 2015(instructor: Erik de Goede).

Delft3D Basic Course – Block 2b Modelling of sediment and bed dynamics in Delft3D, 24-26 June 2015. Deltares Academy Course Material Version 4.00.30857, 15 June 2015 (instructors: Claire van Oeveren, Bert Jagers).

Delft3D-FLOW User Manual- Simulation of multi-dimensional Hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments, Hydro-Morphodynamics. Version 3.15, Revision 36498. Deltares, 24 October 2014.

QUICKIN User Manual- Generation and manipulation of grid-related parameters such as bathymetry, initial conditions and roughness, Hydro-Morphodynamics & Water Quality. Version 4.00, Revision 36418. Deltares, 24 October 2014.

RGFGRID User Manual- Generation and manipulation of curvilinear grids for Delft3D-FLOW and Delft3D-WAVE, Hydro-Morphodynamics. Version 4.00, Revision 36580. Deltares, 24 October 2014.

Estuarine contributions to inner shelf dynamics (ECOIS) Final Report – POCTI/CTA/48461/2002. Fundação para a Ciência e Tecnologia, 2008.

Santos, A. I., Oliveira, A., Balsinha, M. J., Santos, L. Q., & Onofre, J. (2010). "Fluxos sedimentares no estuário do Rio Douro: Existe exportação para a plataforma continental?". *1as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa 21-22 Junho 2010. Lisboa.

Cross-calibration of suspended sediment sensors and samples at a fixed station in the Tejo estuary (SEDEX 2015)

A.I. Santos (1), A. Oliveira (1), S. Moreira (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa, Portugal, ana.santos@hidrografico.pt

Abstract: During the SEDEX 2015 cruise (9-13 November 2015), a fixed station in the Tejo estuary was surveyed hourly, in order to study the suspended sediment signature variation in the water column during a semi-diurnal tidal cycle. With this objective in mind, a mooring was deployed at this position bearing a 600 kHz up looking ADCP and a near bottom RCM9 current-meter coupled with additional salinity and turbidity sensors. At the same time, and during a semi-diurnal tidal cycle, a LISST probe was used to measure suspended sediment concentration and grain size at two levels, and surface water samples were collected to evaluate suspended sediment concentration and composition. In this work the results of the several suspended sediment proxy cross-calibration are presented (ADCP backscatter, turbidity sensor, LISST data and traditional sampling), in order to determine instrumental sensitivities and detection efficiency to the variation of suspended sediment signature at a fixed point. Although not originally designed as a suspended sediment profiler, ADCP echo intensity data revealed itself to be the most efficient suspended sediment proxy in this experiment.

Key words: Tejo, suspended sediments, acoustic techniques, sampling, proxies

1. INTRODUCTION

Knowledge of mass concentration and characteristics of suspended sediments is of upmost importance to understand sediment transport processes in transitional environments like estuaries, inner continental shelfs and coastal areas; however, measurement of these potentially rapidly fluctuating properties has always been difficult at best. The traditional measurement technique has been to take periodic water samples for later analysis. This method may be adequate for some applications but has limitations because of the changeable character of suspended materials, as well as being extremely time consuming. In order to evaluate the usage of indirect suspended sediment measurements using acoustic, optical and laser transmissiometer instrumentation, an inter comparison fixed station was designed in the lower Tejo estuary during the SEDEX cruise in November 2015. The aim of this work is to evaluate instrumental detection efficiency to the variation of suspended sediment signature at this fixed point, in what concerns suspended sediment quantification (concentration) and grain size.

2. METHOD

2.1. Field work

During the SEDEX cruise a mooring was deployed in a position in the lower Tejo estuary from 4-13th Nov. 2015 (Fig. 1). The mooring was composed of a structure bearing a bottom mounted *Anderaa* RCM9 acoustic current meter coupled with salinity, temperature and turbidity sensors; and a upward looking *RDI* Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) working at 600kHz frequency, measuring the current and acoustic backscatter of the whole water column from 1.2 m above bottom. On November 12th, a fixed station was occupied using NRP "*Andrómeda*" anchored at this same position, during approximately a semi-diurnal tidal cycle (10 hours of sampling). During this time, hourly water samples were collected at the surface in order to determine suspended particulate matter (SPM) concentration and composition. At the same time, a LISST (laser *in situ* scattering and transmissometry) probe was lowered into two different levels in the water column (mid-column and near bottom) in order to determine volumetric SPM concentration and grain size distribution (Fig. 2).

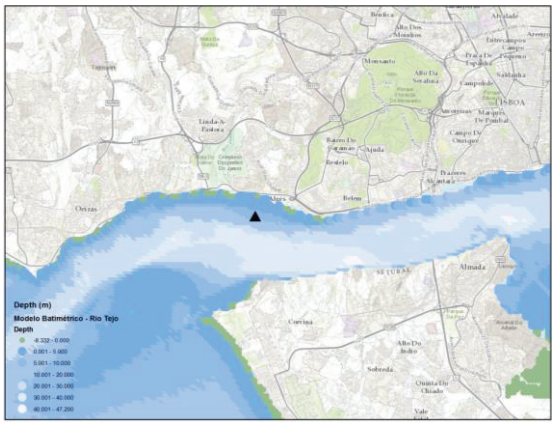


Fig. 1. Cross- calibration station position during the SEDEX Nov. 2015 cruise.

2.1. Laboratory and instrumental data processing

SPM concentration on near surface samples was determined by weight, using 0.45 µm cellulose acetate filters.

LISST data (volumetric concentrations, grain size curves and statistical parameters) were processed using the algorithms provided by the instrument's manufacturer (Agrawal & Mikkelsen, 2008). LISST total volume concentrations (TVC) were converted to mass concentrations using the average value of density determined for bottom sediments collected at this same site during the fixed station (≈1.77 kg/m^3).

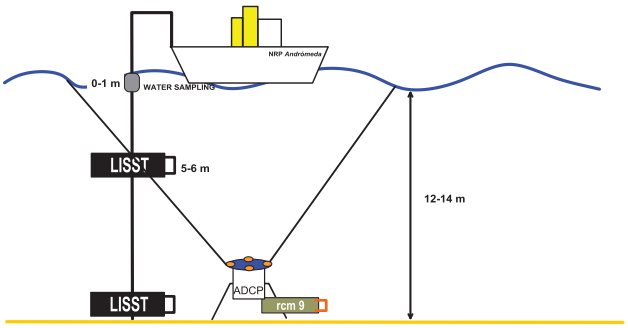


Fig. 2. Schematic representation of the SEDEX Nov. 2015 observations.

ADCP acoustic backscatter (echo intensity) was crossed with SPM sample concentration data at the surface and with LISST volumetric concentrations at mid-column and near bottom levels. Two echo intensity calibrations and conversions into inferred SPM concentration were tested in this work: the algorithms suggested by Kim & Voulgaris (2003) and simple linear correlation between ADCP echo and the logarithm of SPM concentration. Theoretically, an ADCP with working frequency of 600 kHz has optimal sensitivity for coarse material with grain size ≈770 µm (Nortek, 2001, Sontek, 1997), which is much larger than the traditional grain size observed in suspension in these transitional environments with grain size in the order of 100-200 µm, however, cross-calibration results obtained by this author in similar environments yielded SPM estimation values within the same order of magnitude as the concentrations measured by the LISST probe. Kim & Voulgaris (2003) calibration and conversion algorithms yielded 3 different sets of calibration constants, one for each level of observation, with very similar counts/dB conversion factors (Kc) but very different instrumental coefficients (C). Given this result, a simple linear interpolation was attempted trying to correlate the logarithm of the sample and LISST SPM concentration at the three levels and the ADCP echo subtracted by the blank value Er (Fig. 3). Surprisingly good results were obtained from this simpler approach.

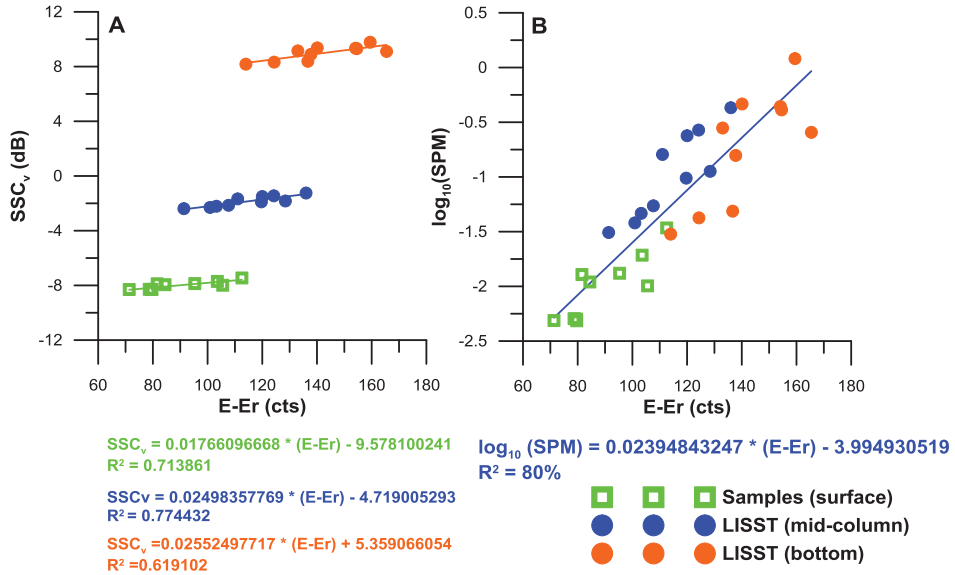


Fig. 3. A – Relation between ADCP echo corrected for the blank value (Er) and SSCv according to Kim&Voulgaris (2003) showing three very different relations for each observation level, although the count to dB conversion factor Kc (line slope) falls into the same magnitude in all three levels. B – Simple linear interpolation between the logarithm of SPM concentrations measured by the LISST at mid column and bottom levels and by surface sampling.

Turbidity is not a direct measurement of the total suspended materials in water. Instead, as a measure of relative clarity, turbidity is often used to indicate changes in the total suspended solids concentration in water without providing an exact quantification (Kemker, 2014). Turbidity standards do not behave the way sediments do in an optical sensor or turbidity meter because the characteristics of turbidity standards differ from the natural sediment. Battisto (2000) states that the response of these types of turbidity sensors is highly sensible to particle size, in fact, in natural environments, grain size is very rarely homogenous, and if a large quantity of silt particles is present in the water column, the turbidity sensor response will be twice as high as the resulting output of the same concentration of sand particles. If the particles are fine silts (10µm), the turbidity sensor response will be ten times higher than for the same concentration of sand particles and fifty times higher if clay particles in the order of 2µm are in suspension. Therefore, if the primary objective is to determine suspended material concentrations, the

calibration of the turbidity sensor should be made with the natural sediment as opposed to turbidity standards (Downing, 2008). Taking into account these recommendations, RCM9 turbidity sensor data downloaded in FTU units were crossed with in situ LISST converted concentrations. This relation yielded a simple through the origin linear correlation allowing the conversion of the turbidity units into mass concentrations.

$$TVC\ LISST\ (g/l) = 0.0077 \times FTU,\ R^2 = 92\%$$

3. RESULTS AND DISCUSSION

Figures 4 through 6 show the time series of the different suspended sediment proxies measured during the fixed station semi-diurnal observations. These figures show that, apparently, all SPM proxies are responding to the same phenomenology, with maxima during ebb and minima during high tide. The tidal variation of SPM characteristics during this cruise will be discussed in this same volume (Santos *et al*, 2016).

Calibrated and converted ADCP backscatter data accurately reproduced sample SPM concentrations at near surface levels, in most cases, within the uncertainty ranges of the laboratory method itself (Fig. 4). Estimation ratios never exceed the factor of 2 and present worst results during ebb probably due to the fact that, during ebb, concentration values evolve very rapidly which means that any deviation on the chronological reference of the sampling procedure will lead to the confrontation of very different concentration levels. Also, direct observation of the sample filters under binocular magnifying glass revealed a stronger biogenic signature during this tidal phase which can lead to a worst performance of these particles as acoustic scatterers.

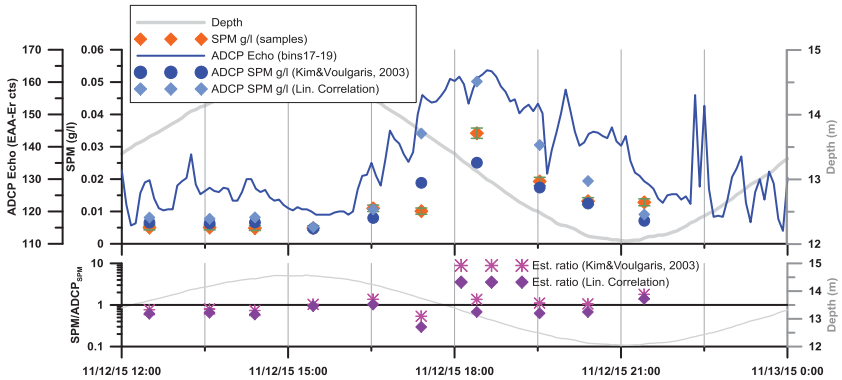


Fig. 4. Near Surface: Top: ADCP Acoustic backscatter, water sample SPM concentration (uncertainty green error bars) and estimated SPM concentration from backscatter data. Bottom: Estimation relation (Sample SPM concentration/Estimated ADCP SPM concentration) at the surface during the November 12th fixed station.

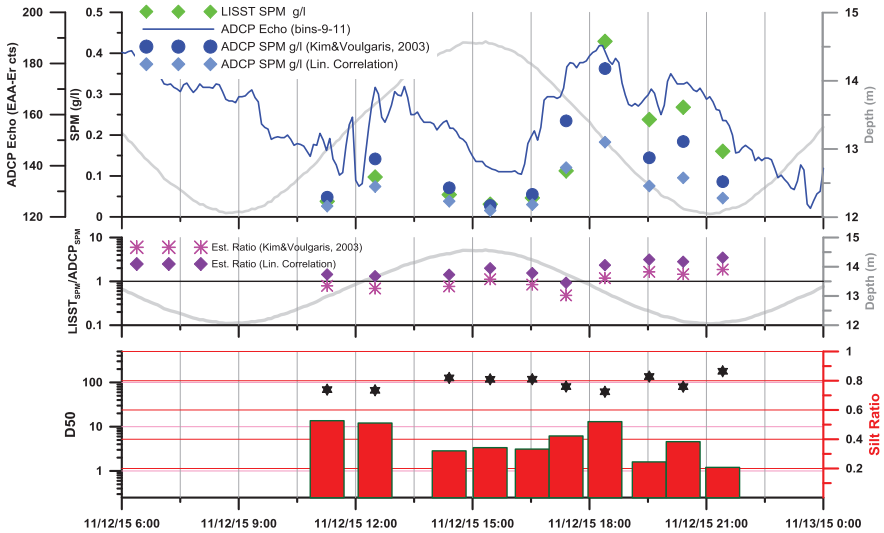


Fig. 5. Mid-Column: Top: ADCP echo, LISST SPM concentrations and estimated SPM concentration from backscatter data; Middle: Estimation relation (LISST SPM concentration/Estimated ADCP SPM concentration); Bottom: Suspended sediment D50 and silt ratio (fine sediment concentration/ total concentration measured by the LISST); at mid-water column during the November 12th fixed station.

At mid-column and near bottom levels, both ADCP estimated SPM concentrations were always within the same order of magnitude as the measured LISST concentrations (Fig. 5). No relation could be inferred between the estimation quality and the sediment

grain size (D50) and silt content (<63 μm) at these levels. Sediment D50 varied between ≈60-180 μm

(average 103 µm) at mid-column level and between ≈80-170 µm (average 118 µm) near bottom (Fig. 5).

Figure 6 shows the time series of the three measurements taken at near bottom during the fixed station converted into mass concentrations. The figure shows that all of the three indirect measurements of suspended sediment concentration, yield congruent concentration values, with the exception of a recurrent peak in the ADCP backscatter data that occurs during low tide, in spring tide periods, with a lesser expression on the turbidity sensor and some expression on LISST concentrations (red arrows on Fig. 6). LISST grain size data shows that in the last two observations, during low tide, the suspended sediment shows a coarser signature (mode ≈300 µm) than the remaining flood, high tide and ebb samples with modes ≈80-100 µm.

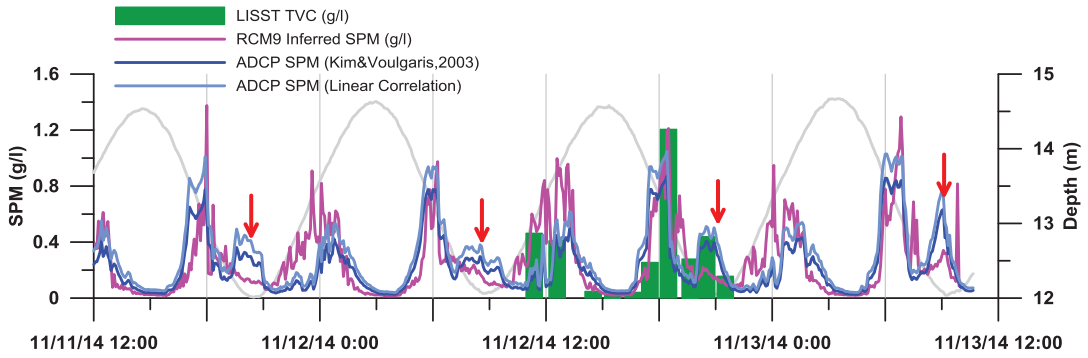


Fig. 6. Near Bottom: ADCP echo (blue line), RCM9 Turbidity (magenta) and LISST TVC (green bars) converted into mass concentrations, measured at near bottom levels during a two day spring tide period including the fixed station observations in November 2015.

4. FINAL REMARKS

During the Nov. 2015 SEDEX cruise the different suspended sediment proxies used at the fixed station responded to the same phenomenology, with maxima during ebb and flood and minima during high tide. The fixed station cross-calibration experiment revealed that, although not originally designed as a suspended sediment profiler, ADCP data revealed itself to be the most efficient suspended sediment proxy in this experiment, given that it provided a good estimation of concentration levels in the whole water column and was sensible to particle size variation throughout the tidal cycle, as opposed to the RCM9 turbidity sensor whose exacerbated sensitivity to finer particles resulted in the underestimation of coarser sediment concentrations.

Acknowledgements

The SEDEX/SISMEX cruise of November 2015 was carried out under the scope of the IH-PT Environmental Characterization Project for the support of Naval Military Operations. The authors wish to thank the NRP "*Andrómeda*" crew and the colleagues Nuno Zacarias, Raquel Melo, André Vinhas and Nuno Lapa for the excellent team work during the SEDEX cruise.

REFERENCES

Agrawal, Y, Mikkelsen, O (2008). "Processing LISST-100 and LISST-100X data in MATLAB". Web: http://www.sequoiasci.com/article/processing-lisst-100-and-lisst-100x-data-in-matlab/.

Battisto, G. (2000). "Field measurement of mixed grain size suspension in the nearshore under waves". MsC Thesis. The College of William and Mary, Virginia.

Downing, J. (2008). "Comparison of Suspended Solids Concentration (SSC) and Turbidity". Campbell Scientific, Inc App.Note code: 2Q-AA.

Kemker, C. (2014). "Measuring Turbidity, TSS, and Water Clarity." Fundamentals of Environmental Measurements. Fondriest Environmental, Inc. 5 Sep. 2014. Wev:

http://www.fondriest.com/environmental-measurements/equipment/measuring-water-quality/turbiditysensors- meters-and-methods/.

Kim, Y. H.; Voulgaris, G. (2003). Estimation of suspended sediment concentration in estuarine environments using acoustic backscatter from an ADCP. *Proc. Fifth Int. Conf. on Coastal Sediments*, Clearwater Beach, FL, World Scientific Corporation, CD-ROM.

Santos, A.I.; Oliveira, A., Moreira, S. (2016) "Tidal suspended sediment signature variation at a fixed station in the Tejo estuary (SEDEX 2015)". *4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa 21-23 Junho, 2016.

Tidal suspended sediment signature variation at a fixed station in the Tejo estuary (SEDEX 2015)

A.I. Santos (1), A. Oliveira (1), S. Moreira (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa, Portugal, ana.santos@hidrografico.pt.

Abstract: During the cruise SEDEX 2015(9-13 November 2015), a fixed station in the Tejo estuary was surveyed hourly, in order to study the suspended sediment signature variation in the water column during a semi-diurnal tidal cycle, with simultaneous bottom sediment sampling. All used suspended sediment proxys showed a good qualitative inter-relation (ADCP backscatter, turbidity sensor, LISST data and traditional sampling). At this point of the Tejo estuary, suspended sediment signatures respond mainly to the semi-diurnal tidal phase, with a higher prevalence of marine biogenic and clay mineral composition during floods and a riverine terrigenous signature during ebbs.

Key words: Tejo, suspended sediments, tidal forcing, estuaries.

1. INTRODUCTION

Knowledge of mass concentration and characteristics of suspended sediments is of upmost importance to understand sediment transport processes in transitional environments like estuaries, inner continental shelfs and coastal areas. The tidal variation of sediment transport patterns in what concerns suspended sediment concentration and composition has been addressed in several Portuguese estuaries namely the Guadiana (Santos, 2005) and the Douro and Minho (ECOIS, 2008). The SEDEX cruise (November 2015) main objective was the environmental characterization of the Tejo estuary in order to support naval warfare operations and safe harbour access for civilian mariners. This work describes the suspended sediment signature variation in a fixed station in the northern margin of the Tejo navigational channel.

2. METHOD

During the SEDEX cruise a fixed observation station was established in a position in the lower Tejo estuary from 4-13th Nov. 2015 (Fig. 1). This station was monitored through an observation period that covered both neap and spring tidal amplitudes. On November 12th, shorter period observations and sample collection were made at NRP "*Andrómeda*" anchored at this same position, during approximately a spring semi-diurnal tidal cycle (10 hours of sampling). Details regarding mooring configurations, observations and sampling are described in detail in Santos *et al*. (2016).

Suspended particulate matter (SPM) concentration on near surface samples was determined by weight, using 0.45 µm cellulose acetate filters. SPM mineralogical composition was determined, by X-ray diffraction (4º-35º, 2Θ with CuKα radiation) and by direct observations of the sample filters using magnification from 10x up to 115x.

LISST data (volumetric concentrations, grain size curves and statistical parameters) were processed using the algorithms provided by the instrument's manufacturer (Agrawal & Mikkelsen, 2008). LISST total volume concentrations (TVC) were converted to mass concentrations using the average value of density determined for bottom sediments collected at this same site during the fixed station (≈1.77 kg/m^3). ADCP acoustic backscatter (echo intensity) was crossed with SPM sample concentration data at the surface and with LISST volumetric concentrations at mid-column and near bottom levels. ADCP echo intensities (acoustic backscatter) and RCM9 turbidity were calibrated and converted into inferred SPM concentration using the methodology discussed in Santos *et al*. (2016).

Tejo river flow time series were only available at the Almourol hydrometric station, 130 km upstream from the fixed station observations. Meteorological time series were obtained for the Monte da Caparica station. All data were obtained via the National Hydric Resources Information System (www.snirh.pt).



Fig. 1. Cross- calibration station position during the SEDEX Nov. 2015 cruise.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 2 shows the time series of the instrumental data collected at the fixed station for the 10 day period, together with the hydrological and meteorological monitoring data for the same period. Official tidal predictions (www.hidrografico.pt) for the Port of Lisbon indicate a tidal amplitude varying from ≈ 1.5-3 m at the beginning of the series (neap) and 0.8-3.7 m in the end (spring). At the fixed station current structure in the water column responded mainly to tidal fluctuation and was aligned with the general direction of the estuarine margins at this point (upstream E and downstream W). Current velocities were always higher during ebbs than floods and at surface levels. A closer look at the current structure during the Nov. 12th observations (Fig. 3) reveals that current stratification is present during the second half of ebb and during low tide. Density stratification forces the ebb flow (less saline) to be concentrated mainly at the surface as flood propagates at near bottom levels. At this point in the lower estuary, near bottom RCM9 data shows the tidal variation in salinity levels from 32 to 33 during low tide rising up to 35 during high tide. RCM9 data also shows a punctual event just after 12:00 on Nov. 7th that resulted in a sharp increase on turbidity/inferred suspended sediment concentration synchronous with a sharp decrease in salinity down to 27. This event seemed to be restricted to very short time interval and close to bottom levels, since no evidence was registered on ADCP data. The proximity of the fixed station position to the outlet of the Jamor stream (Fig.1) can lead to the supposition that this event could be the result of a high flow event into the estuary at this time. Although this is a very small stream, floods in the Jamor basin have been reported, sometimes with catastrophic consequences (eg. the Feb. 28th 2008 event). These flood events are generally associated with heavy rainfall, which was not the case on Nov, 7th, however, due to the extreme artificialization of the Jamor course which runs mainly through the heavily urbanized area of Greater Lisbon, it is possible that this high flow event in this water line are not directly associated with natural forcing but with human intervention.

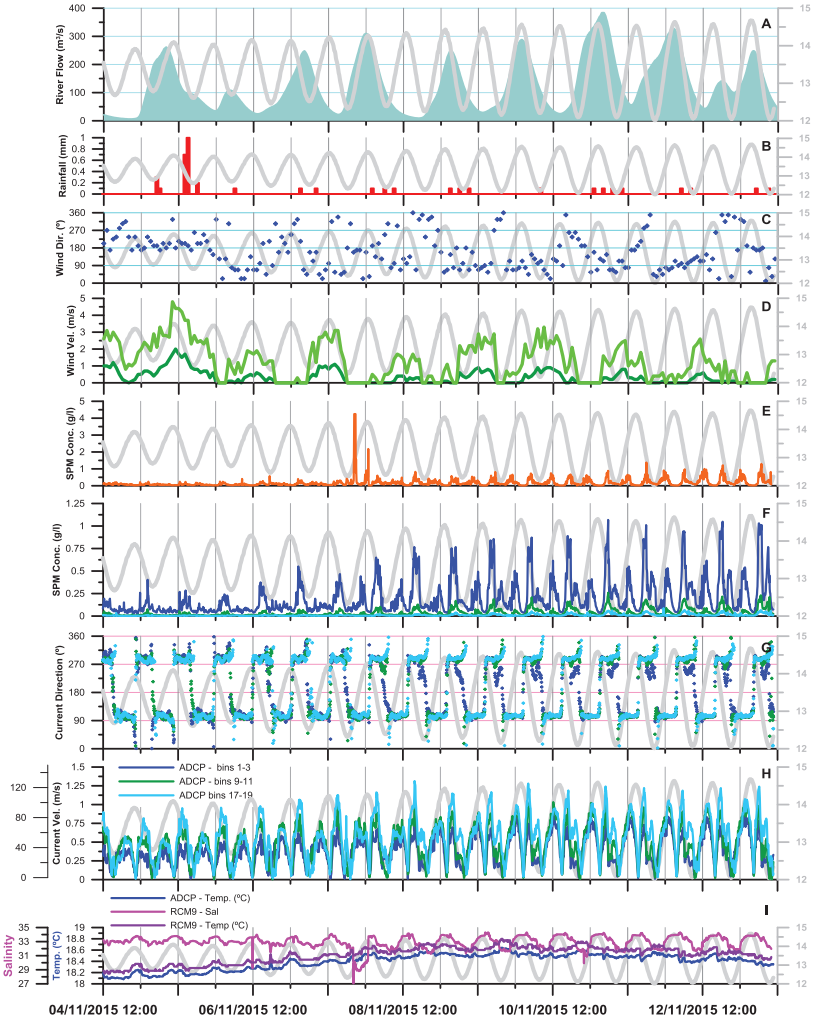


*Fig. 2. Hidrology (Almourol) - **A:** Tejo River flow; Meteorology (Monte da Caparica) - **B:** Rainfall, **C:** Wind direction, **D:** Wind velocity; Instrumental data (ADCP blue=near bottom; green=mid-column; light blue= near surface) – **E:** RCM9 inferred suspended particulate matter concentration, **F:** ADCP inferred SPM concentration, **G:** ADCP current direction, **H:** ADCP current velocity magnitude, **I:** Salinity (RCM9) and temperature (RCM9 and ADCP) at near bottom(ADCP depth in m, in the grey background of all graphs).*

Surface suspended sediment sample mineralogical analysis revealed a monotonous composition of chlorite (4-11%), illite (30-70%), kaolinite (12-34%), quartz (3-15%), potassium feldspars (0-11%), plagioclase (0-11%) and calcite (0-10%). The influence of marine signature waters during flood and high tides are marked by the dominance of the phyllosilicates (clay minerals) illite and kaolinite, which decrease in importance during ebb, giving way to a more terrigenous grained signature of quartz and feldspars. The calcite content does not seem to be related to the hydrodynamic forcing of the water column, and is probably related with the presence of calcitic biogenic remains (eg. larval gastropod and lamelibranchia, and calcareous nannoplankton) (Fig.3).

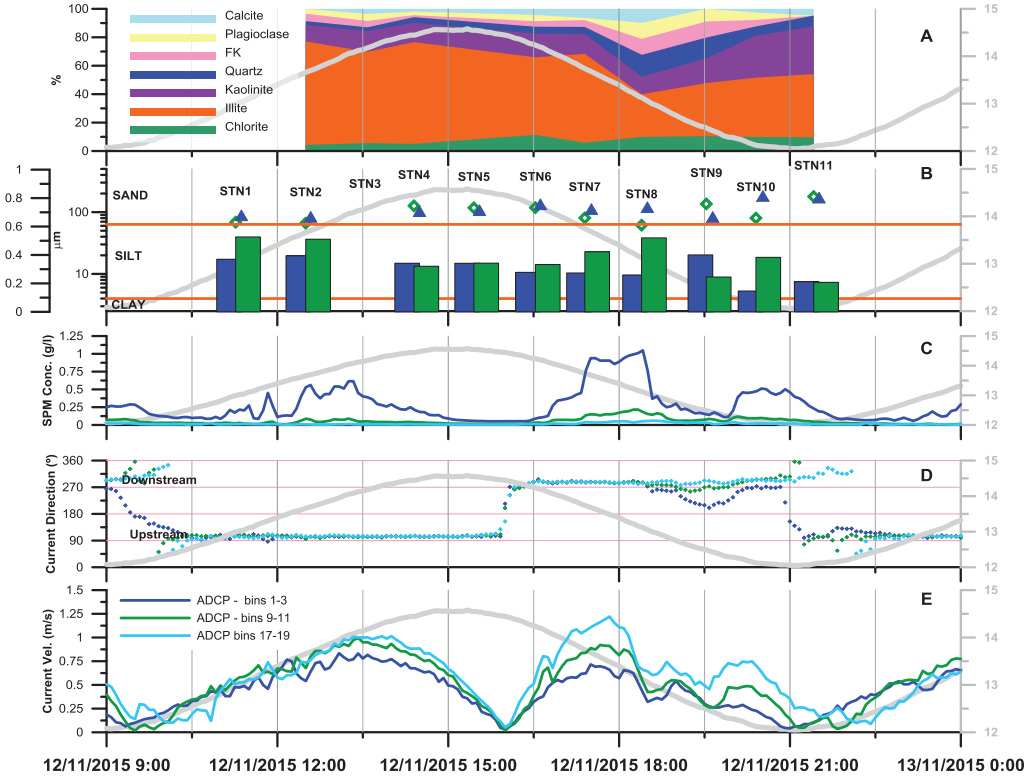


*Fig. 3. Nov. 12th fixed station observations - **A:** Mineralogical composition of surface samples; **B:** LISST D50 (bars) and fine sediment (<63 µm) ratio (symbols) at mid column and near bottom levels (blue= bottom, green, mid-column) **C:** ADCP suspended material concentration; **D:** ADCP current direction; **E:** ADCP current velocity magnitude (ADCP depth in m, in the grey background of all graphs).*

Direct observations of the sample filters revealed that flood samples present a higher organic/inorganic material ratio, leading to the assumption that, together with the higher clay mineral content, the marine water signature in this part of the Tejo estuary is also richer in biogenic material. Ebb and low tide resulted in a higher predominance of inorganic/terrigenous material, with a return of the organic prevalence in STN11 after the tide turn. These direct observation results only confirm the conclusions taken from the mineralogical analysis: The marine signature in the lower estuary is marked by the presence of clay minerals and organic/biogenic material and the riverine influence in this part of the lower estuary is marked by the presence of a terrigenous grained signature (quartz + feldspars and inorganic prevalence on filter observation).

Filter observation also allowed for the identification and measuring of some particles: charcoal (present in all samples, 50 µm in STN5), micas (measured at 80 and 140 µm) and angular hyaline quartz (40 µm). The effects of anthropogenic particles were also identified in all samples, with the presence of microfibers/microplastics (500 µm). The identifiable phytoplankton was mainly composed of centric diatoms (in all samples, especially on STN2, measured example of 160 µm). Specimens of *Nitzschia seriata*, *Skeletonema sp.* and *Triceratium sp.* were identified in several samples, but *Actinoptychus sp* was only identified in in STN7 (ebb). Dinoflagellates were generally rare with a specimen of *Ceratium tripos* and other of *Ceratium furca* found in STN5 and STN6. Copepods (measured specimen of 433 µm) were found in all samples from STN2 to STN8 (with exception of STN3), occurring in higher number in STN4 and STN5 (high tide). Larval forms of gastropods and lamellibranches were identified in samples STN8 through 11 in low number (1 to 3). Although rare, foraminifera (measured at 100 µm) can be found in 4 samples.

LISST time series of grain size and fine sediment ratio at mid column and near bottom levels reveal a very similar grain size signature (coarse silt/very fine sand, 40-50% fine fraction – Fig. 3) at both

levels, especially during flood, high tide and beginning of ebb. However, LISST grain size curves (Fig.4) reveal the true vertical variability in the suspended sediment signature, not clear in Figure 3. Mid column grain size curves generally show a highly variable multi-modal distribution during the tidal cycle, whilst near bottom samples grain size signatures vary according to the tidal phase. Near bottom LISST main modes generally agree with bottom sediment grain size signatures, although a very clear fine sediment secondary mode (≈10 μm) present on bottom sediments has no expression on LISST data, which is of no surprise because the process behind bottom sediment grain size analysis included the use of a dispersant and organic matter elimination (hydrogen peroxide-130 V) which results in the destruction of flocs and clay aggregates, present in the natural environment and measured *in situ* by the LISST as coarser material.

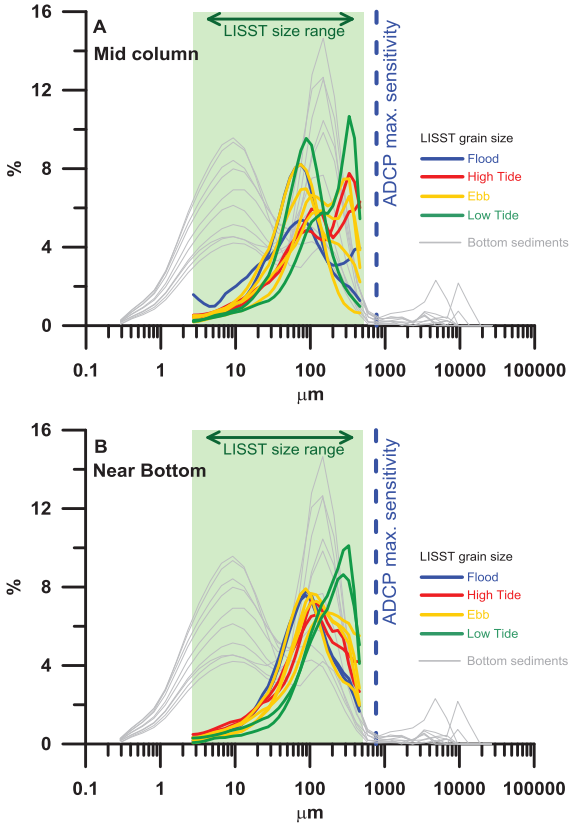


Fig. 4. LISST grain size curves measured at mid column (A) near bottom (B) levels and bottom sediments grain size curves collected at the same site during the Nov. 12th fixed station observations.

4. FINAL REMARKS

At the SEDEX Nov. 2015 fixed station suspended sediment signature in the lower Tejo estuary responds mainly to tidal forcing. No relation to the suspended sediment signature could be inferred with meteorological forcing or river flow. Nevertheless, a high concentration/low salinity event (Nov. 7th) was registered at near bottom level in the fixed station mooring may suggest the local influence of the highly artificialized Jamor stream at this point of the estuary, however, available monitoring data does not allow to confirm this hypothesis.

Marine signature of suspended sediments during floods and high tides is characterized by the predominance of organic/biogenic material and clay minerals. Riverine signature is associated with the presence of a terrigenous grained component mainly made up of quartz, feldspars and mica, with a decrease on the relative importance of organic material. Evidences of anthropogenic marine debris (microfibers and microplastics) were detected in almost every SPM sample, regardless of the tidal phase

Acknowledgements

The SEDEX/SISMEX cruise of November 2015 was carried out under the scope of the IH-PT Environmental Characterization Project for the support of Naval Military Operations. The authors wish to thank the NRP "*Andrómeda*" crew and the colleagues Nuno Zacarias, Raquel Melo, André Vinhas and Nuno Lapa for the excellent team work during the SEDEX cruise.

REFERENCES

Agrawal, Y, Mikkelsen, O (2008) "Processing LISST-100 and LISST-100X data in MATLAB". Web: http://www.sequoiasci.com/article/processing-lisst-100-and-lisst-100x-data-in-matlab/.

ECOIS, Team (2008). ECOIS - Estuarine Contributions on Inner Shelf Dynamics (POCTI/CTA/48461/2002). Relatório Final, FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia.

Santos, A.I. (2005). Caracterização Hidro-sedimentológica do estuário do Guadiana. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.

Santos, A.I.; Oliveira, A., Moreira, S. (2016) "Cross-calibration of suspended sediment sensors and samples at a fixed station in the Tejo estuary (SEDEX 2015)". *4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa 21-23 Junho, 2016.

Agitação marítima e potencial de transporte sedimentar longitudinal a sul da embocadura do rio Mondego

João Nuno C. Oliveira (1), Filipa S. B. F. Oliveira (1), António Trigo Teixeira (2)

(1) Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. joao.c.oliveira@tecnico.ulisboa.pt.

(2) CEHIDRO, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001; Lisboa, Portugal.

Resumo: Com este estudo pretendeu-se caracterizar a agitação marítima e o potencial de transporte sedimentar por ela induzido a sul da embocadura do rio Mondego, no período de 1952 a 2010. Com base na análise estatística da série temporal de parâmetros de onda (*hindcast*) validados para o período de estudo, identificou-se um regime com grande variabilidade interanual e sazonal, com direção média 299.5ºN e obliquidades extremas 290/311ºN no inverno/verão (janeiro/agosto), e bastante energético, com 40% de ocorrência de altura significativa superior a 2 m. Da utilização desta longa série de dados, em conjunto com dados geomorfológicos locais, no cálculo do potencial de transporte longitudinal, baseado no modelo numérico *LITDRIFT-process based*, destacam-se valores anuais bastante variáveis, de 580-1 500 x10^3 m^3/ano, com deriva para sul em 78% dos anos, de média 600 x10^3 m^3/ano. Identificou-se também a distribuição transversal do transporte longitudinal na zona ativa, com extensão média de 2 km.

Palavras-chave: agitação marítima, transporte sedimentar longitudinal, *LITDRIFT*, Figueira da Foz.

1. INTRODUÇÃO

As variações morfológicas da linha de costa são provocadas pelo gradiente de transporte sedimentar longitudinal e pela interação com as diversas estruturas materializadas ao longo da mesma. Esta análise antecede o estudo da evolução da linha de costa a sul da embocadura do rio Mondego, zona fortemente influenciada por diversas intervenções antrópicas. O conhecimento das características da agitação marítima, nível do mar, sedimentologia e topo-hidrografia é fundamental na determinação do volume sedimentar mobilizado que induz este processo evolutivo.

Analisou-se o regime de agitação marítima para o período 1952-2010. Utilizando dados sinóticos de nível do mar, determinou-se o potencial de transporte sedimentar longitudinal a sul da embocadura do rio Mondego, para o mesmo período, com base em modelação numérica.

2. DADOS E MÉTODO

2.1. Agitação marítima

Com base na aplicação de um modelo espectral de geração e propagação de ondas marítimas ao Nordeste do Oceano Atlântico, com uma resolução espacial de 0.5° e um passo temporal de 6 horas, obteve-se a série temporal dos parâmetros altura significativa (Hs), período de pico (Tp) e direção média de incidência ou rumo (Dir), no ponto de coordenadas geográficas 9°00'W e 40°00'N, centrado em frente à zona de estudo (Dodet *et al.*, 2010).

A caracterização da agitação marítima no local de interesse baseia-se na análise estatística do regime geral e da sua variabilidade sazonal e interanual. Para os parâmetros Hs, Tp e Dir estimam-se as frequências de ocorrência de classes de intervalos semiabertos no limite superior e amplitude 0.50 m, 2 s e 10º, respetivamente, assim como os parâmetros estatísticos média, desvio padrão, mínimo e máximo, e 1º, 2º e 3º quartis das séries temporais correspondentes aos regimes geral e sazonais. A sazonalidade considerada tem por base as estações marítimas de inverno (outubro a março) e verão (abril a setembro) e a mensalidade.

2.2. Nível do mar, topo-hidrografia e sedimentologia

A série temporal do nível do mar utilizada resulta da composição da maré astronómica com a componente meteorológica, obtidas com recurso a dados de hindcast.

O perfil transversal de praia representativo da zona de estudo selecionou-se com base na caracterização morfológica de Oliveira e Brito (2015) para o trecho litoral entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis.

A escolha do diâmetro mediano representativo, d_{50}=0.30 mm, fez-se a par da escolha do perfil de praia, recorrendo ao cálculo de perfis de equilíbrio e seu ajustamento ao perfil representativo.

2.3. Potencial de transporte sedimentar longitudinal

O potencial de transporte sedimentar, Qs, calculou-se com recurso ao modelo *LITDRIFT*, um modelo bidimensional no plano vertical (2D-V) para cálculo do transporte sedimentar na componente

longitudinal, integrado no sistema de modelos numéricos determinísticos *LITPACK* que descrevem os principais processos físicos costeiros (DHI, 2014). Este modelo tem por base o modelo numérico intra-onda *Quasi*-3D *LITSTP*, que descreve os processos de transporte não-estacionários ao longo do ciclo da onda. Recorreu-se ao módulo *Transfer Wave Climate* presente no *LITDRIFT* para transferência do clima de agitação marítima até à batimétrica -14 m ZH.

Esta grandeza analisou-se nas suas componentes Qs Sul, potencial de transporte sedimentar dirigido para o quadrante à esquerda de um observador em terra de frente para o mar (sentido negativo), e Qs Norte, transporte dirigido para a direita do mesmo observador (sentido positivo). A soma do valor absoluto e relativo das duas componentes denominou-se Qs Total e Qs Resultante, respetivamente. À última corresponde o potencial de transporte na direção dominante.

A análise estatística dos valores anuais de Qs complementou-se com o estudo do comportamento de anos relevantes em termos de potencial de transporte: o ano de Qs Total médio, e os anos de valores extremos e médios de Qs Sul e Qs Norte.

3. RESULTADOS - AGITAÇÃO MARÍTIMA

3.1. Regime geral

A zona de estudo está sujeita a uma agitação marítima que no local referido se caracteriza por Hs média 2.15 m e predominância das classes 1.00-1.50 m (26%), 1.50-2.00 m (23%) e 2.00-2.50 m (14%) (Fig. 1a). A média de Tp é 11.6 s, sendo as classes mais frequentes 10-12 s (27%), 12-14 s (27%) e 8-10 s (21%) (Fig. 1b). Cerca de 90% dos rumos estão entre 270-330ºN, sendo que o valor médio da Dir é 299.5ºN e predominam as classes 300-310Nº (23%), 290-300ºN (21%) e 310-320ºN (16%) (Fig. 2). Da análise dos quartis dos respetivos parâmetros, concluiu-se que 50% das ocorrências se situam entre 1.31-2.64 m, 9.5-13.4 s e 289.4-312.9ºN e que as medianas são 1.78 m, 11.4 s e 301.2ºN.

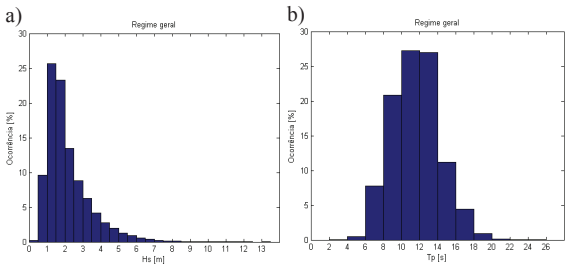


Fig. 1. Histogramas de a) Hs e b) Tp, relativos ao regime geral de agitação marítima a sul da Figueira da Foz.

A análise conjunta de Dir-Hs, Dir-Tp e Tp-Hs revelou que:

i) 50% das ocorrências se enquadram nas classes: Dir 280-320ºN e Hs 1.00-2.50 m; Dir 280-310ºN e Tp 8-16 s; Tp 8-12 s e Hs 1.00-2.50 m; ii) 90% enquadram-se nas classes: Dir 260-340ºN e Hs 0.50-4.50 m; Dir 270-340ºN e Tp 6-18 m; Tp 6-16 s e Hs 0.50-4.50 m; iii) os rumos mais frequentes verificam-se entre 300-310ºN (23%), maioritariamente associados às classes de Hs 1.00-1.50 m (6%) e de Tp 10-12 s (7%); iv) Hs mais frequente verifica-se entre 1.00-1.50 m (26%), maioritariamente associada a Tp entre 8-10 s (10%);

v) Tp mais frequente verifica-se entre 10-12 s (27%), maioritariamente associado à classe de Hs 1.50-2.00 m (9%); vi) Hs ≥ 9.5 m ocorre exclusivamente associada a Dir entre 270-290ºN e Tp entre 16-22 s.

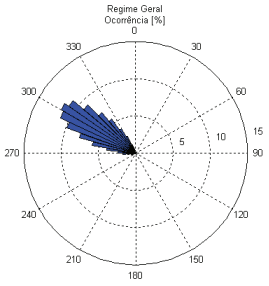


Fig. 2. Histograma polar de Dir em classes de 5º, relativo ao regime geral de agitação marítima a sul da Figueira da Foz.

3.2. Sazonalidade

No inverno/verão marítimo (Fig. 3):

i) Hs média é 2.66/1.63 m, predominando as classes 1.50-2.00/1.00-1.50 m (19/37%); Tp médio é 12.9/10.2 s, predominando as classes 12-14/8-10 s (39/35%); Dir média é 293.4/305.6ºN, predominando as classes 290-300/300-310ºN (24/25%); ii) da análise dos quartis para Hs, Tp e Dir, respetivamente, concluiu-se que 50% das ocorrências se situam entre 1.65-3.36/1.15-1.89 m, 11.4-14.5/8.5-11.4 s e 284.5-306.4/296.0-317.1ºN, e que as medianas são 2.33/1.48 m, 12.8/10.0 s e 295.6/306.8ºN; iii) 75% das ocorrências de Hs enquadram-se entre 1.00-3.50/0.50-2.00 m, 80% de Tp entre 10-16/6-12 s e 73/79% de Dir entre 280-310/290-320ºN, significando rumos mais rodados para oeste/noroeste; iv) Hs ≥ 4.00 m representa 16/1% das ocorrências.

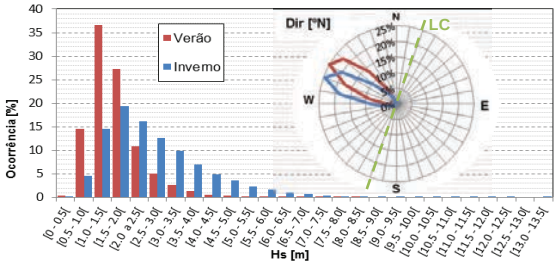


Fig. 3. Histograma duplo (inverno e verão marítimos) e histogramas polares de Dir, com referência à orientação média da linha de costa (LC), 19.5ºN.

A análise mensal permite acrescentar que as médias de Hs e Tp, respetivamente, são máximas em janeiro, 3.02 m e 14 s, e mínimas em julho, 1.39 m e

9 s. As médias mensais de Dir restringem-se ao intervalo 289-311ºN, verificando-se as obliquidades extremas, oeste/noroeste (290/311ºN), em janeiro/agosto.

4. RESULTADOS - POTENCIAL DE TRANSPORTE SEDIMENTAR

4.1. Variabilidade interanual

As quatro componentes do transporte sedimentar longitudinal obtiveram-se para cada um dos 59 anos do período em estudo. Pode concluir-se desde logo a elevada variabilidade interanual do potencial de transporte sedimentar, não se identificando nenhum padrão na sua variação temporal.

A média anual do potencial de transporte para sul tem o valor de 597 $x10^3$ m^3, com um desvio padrão de 133 $x10^3$ m^3. Os valores de Qs Sul máximo e mínimo verificados foram a 915 e 283 $x10^3$ m^3, respetivamente. Dos valores anuais de Qs Sul, 54% apresentaram-se superiores à média anual.

A média anual de Qs Norte tem o valor de 321 $x10^3$ m^3, com um desvio padrão de 184 $x10^3$ m^3. Os valores de Qs Norte máximo e mínimo verificados foram 829 e 95 $x10^3$ m^3, respetivamente. Dos valores anuais de Qs Norte, 44% apresentaram-se superiores à média anual.

A média anual de Qs Total tem o valor de 918 $x10^3$ m^3, com um desvio padrão de 187 $x10^3$ m^3. Os valores de Qs Total máximo e mínimo verificados foram 1 498 e 578 $x10^3$ m^3, respetivamente. Apenas 39% dos anos em estudo verificaram Qs Total superior à média.

A média anual de Qs Resultante tem o valor de 276 $x10^3$ m^3 na direção sul, com um desvio padrão de 260 $x10^3$ m^3. O valor máximo de Qs Resultante para sul e norte foi 718 e 300 $x10^3$ m^3, respetivamente. A deriva litoral registou-se predominantemente para sul, em 46 dos 59 anos (78%).

Em termos de comportamentos representativos e extremos, destacam-se os seguintes anos:

i) o ano de 1994, em que se observou Qs Total mais próximo de Qs Total médio dos 59 anos em análise, com 917 $x10^3$ m^3. Neste ano, registaram-se para Qs Sul e Qs Norte valores de 679 e 238 $x10^3$ m^3;

ii) o ano de 1956, em que Qs Sul mais se aproximou do volume médio mobilizado para sul nos 59 anos, com 600 $x10^3$ m^3, sendo 1986 o ano em que este potencial de transporte foi máximo, 915 $x10^3$ m^3;

iii) o ano de 1974, em que Qs Norte mais se aproximou do volume médio mobilizado para norte, com 326 $x10^3$ m^3, sendo 1978 o ano em que este potencial de transporte foi máximo, 829 $x10^3$ m^3.

4.2. Análise ao ano de potencial de transporte total médio

A análise conjunta dos parâmetros H_{rms}, Dir e Qs revela que os eventos com direção incidente mais rodada a norte estão maioritariamente associados a alturas de classes inferiores a 2 m, sendo mais frequentes nos meses de verão marítimo.

A ocorrência dos eventos mais energéticos, com alturas de onda mais elevada, verifica-se para direções inferiores a 300ºN e durante o inverno marítimo, causando transporte na direção norte. No entanto, o Qs Resultante nesta estação marítima mantém-se para sul.

4.2.1. Balanço sedimentar e distribuição transversal

A análise do diagrama de balanço sedimentar, designação atribuída ao Qs Total discretizado em função dos parâmetros de agitação marítima H_{rms} e Dir, à entrada do perfil (-14 m ZH), para 1994, juntamente com a curva de distribuição de Qs Norte e Qs Sul ao longo do perfil representativo (Fig. 4), revelou que:

i) os eventos com alturas de onda nas classes de 2.00-5.00 m, incidentes no intervalo de direções de

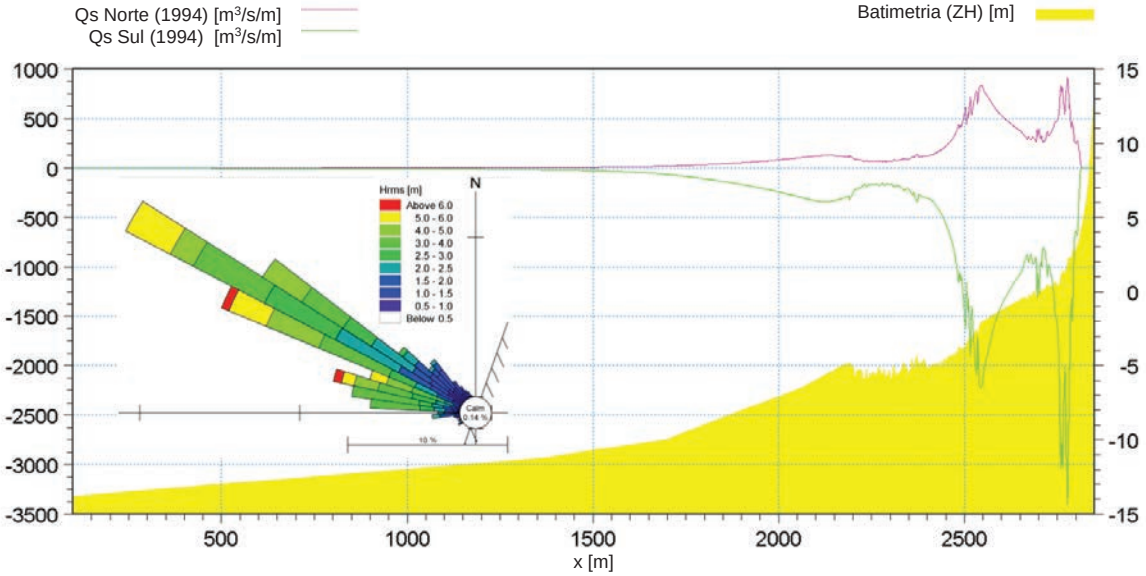


Fig. 4. Diagrama de balanço sedimentar (Qs Total discretizado por classes dos parâmetros H_{rms} e Dir),e distribuição transversal de Qs

295-305ºN, têm grande capacidade de mobilização de sedimentos;

ii) a zona ativa do perfil de praia inicia-se à profundidade aproximada de 11.30 m e tem uma extensão transversal de 1500 m;

iii) do largo para a costa, o transporte aumenta gradualmente até se evidenciar um primeiro pico à profundidade de 5 m ZH, aproximadamente a 650 m da costa (isolinha de NMM), causado pela existência de uma barra submersa, e dois picos de transporte às cotas – 2 e 1.5 m ZH (a 230 e 20 m da costa, respetivamente), devidos à brusca mudança de declive de fundo.

4.2.2. Sazonalidade

Para uma avaliação mais detalhada da sazonalidade de Qs, analisou-se o período de abril de 1994 a março de 1995 de forma a abranger duas estações marítimas completas e consecutivas:

i) no inverno marítimo verificou-se o maior potencial de transporte de sedimentos, 524 $x10^3$ m^3, sendo que no verão apenas se verificou capacidade para mobilizar 60% deste volume, 313 $x10^3$ m^3;

ii) no verão, a capacidade de mobilização dos sedimentos dividiu-se em 15% para norte e 85% para sul, resultando numa deriva para sul de 43% do volume total mobilizado neste ciclo verão-inverno. No inverno verifica-se 22% para norte e 78% para sul, resultando numa deriva para sul de 57% do volume total do ciclo;

Em síntese, apesar da sazonalidade da intensidade da deriva, mais elevada no inverno, é evidente em ambas as estações a tendência da deriva resultante para sul existente na costa oeste portuguesa.

4.3. Análise aos anos de potencial de transporte para sul médio e máximo

No ano de 1956/1986 registou-se o valor médio/máximo de Qs Sul. Neste ano, H_{rms} registou um valor médio de 1.36/1.65 m e uma moda de 1.45/2.23 m, ascendendo a alturas de 5.50/7.90 m. Para Dir, registou-se uma média de 302/300ºN e moda de 292/290ºN, valor superior à Dir normal à orientação média da LC (289.5ºN).

Constata-se que são os eventos com H_{rms} e Dir nas classes de 3.00-6.00 m e 290-300ºN que pesam no comportamento extremo de Qs Sul verificado no ano de 1986, em que a zona ativa se inicia à profundidade de 12.90 m ZH e tem uma extensão de 2270 m, valores superiores aos verificados no ano de Qs Total médio.

4.4. Análise aos anos de potencial de transporte para norte médio e máximo

No ano de 1974/1978 registou-se o valor médio/máximo de Qs Norte. Neste ano, H_{rms} registou um valor médio de 1.57/1.61 m e uma moda de 2.43/1.17 m. Para Dir, registou-se uma média de 300/299ºN e uma moda de 285/291ºN, valor inferior/superior à Dir normal à orientação média da LC (289.5ºN).

Constata-se que são os eventos com H_{rms} nas classes de 3.00-6.00 m e Dir 290-300ºN e superiores a 3.00 m com Dir 270-285ºN que pesam no comportamento extremo de Qs Norte verificado no ano de 1978, sendo estas últimas incidências de sul responsáveis pela deriva para norte. A zona ativa inicia-se à profundidade de 12.30 m ZH e tem uma extensão de 1970 m, valores inferiores aos verificados do ano de Qs Sul máximo, mas ainda superiores aos verificados no ano de Qs Total médio.

5. CONCLUSÕES

Os resultados desta análise revelam que o trecho em estudo está sujeito a um regime geral de agitação marítima de elevada energia caracterizado por uma forte sazonalidade.

A análise do potencial de transporte sedimentar longitudinal obtido neste período de 59 anos permitiu concluir sobre a elevada variabilidade interanual e sazonal desta grandeza e da extensão da zona ativa associada, e caracterizar valores médios e extremos ocorridos.

O facto de a análise se basear numa série temporal de dados de agitação marítima muito longa, robustece a representatividade dos parâmetros expostos, cuja validação é feita em Oliveira *et al.* (2016).

REFERÊNCIAS

DHI. (2014). *LITPACK* - An Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics - A Short Description. Danish Hydraulic Institute. Copenhaga, Dinamarca, 17pp.

Dodet, G., Bertin, X., e Taborda, R. (2010). Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modelling*, Vol. 31, 120-131.

Oliveira, F.S.B.F. e Brito, F.A. (2015). Evolução da morfologia costeira a sul da embocadura do rio Mondego, de 1975 a 2011. *VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, CD-ROM, 15 pp.

Oliveira, J. N. C., Oliveira, F. S. B. F. e Teixeira, A. T. (2016). Evolução da linha de costa a sul da embocadura do rio Mondego: modelação do impacte do prolongamento do molhe norte. *IV Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa, Portugal.

Evolução da linha de costa a sul da embocadura do rio Mondego: modelação do impacte do prolongamento do molhe norte

João Nuno C. Oliveira (1), Filipa S. B. F. Oliveira (1), António Trigo Teixeira (2)

(1) Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. joao.c.oliveira@tecnico.ulisboa.pt.

(2) CEHIDRO, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001; Lisboa, Portugal.

Resumo: A necessidade de mitigar o efeito erosivo observado na costa oeste portuguesa, resultante da carência sedimentar, levou a que a zona de estudo, uma extensão de 30 km de linha de costa a sul da Figueira da Foz, tenha sido fortemente intervencionada através da construção de esporões e defesas longitudinais aderentes. Entre 2008 e 2010 foi prolongado o molhe norte da embocadura do rio Mondego em cerca de 400 m. Este estudo teve como objetivo avaliar o impacte desse prolongamento nas praias a sul, com recurso ao modelo numérico de evolução de linha de costa LITLINE. O modelo foi calibrado para o período 1996-2001 e verificado para o período 2001-2008, com base em linhas de costa observadas e dados de agitação marítima sinóticos. A previsão da evolução nos 12 anos subsequentes ao prolongamento evidencia um recuo generalizado da linha de costa, acentuado a sotamar dos esporões existentes.

Palavras-chave: modelação numérica, *LITLINE*, morfodinâmica, evolução da linha de costa, erosão, Figueira da Foz.

1. INTRODUÇÃO

É do conhecimento geral que o litoral português suporta uma diversidade de atividades imprescindíveis que tiram partido do seu valor natural, económico e cultural. No entanto, a crescente ocupação litoral é frequentemente incompatível com a dinâmica natural, e a degradação do sistema costeiro, nomeadamente devido a problemas relacionados com a erosão costeira, resulta de estratégias de intervenção não integradas. A regeneração do litoral, processo complexo e demorado, não será possível sem a correta compreensão da dinâmica costeira para fundamentar modelos de ordenamento do território mais sustentados e validar políticas de intervenção e gestão do espaço e do risco na zona costeira (Santos *et al.*, 2014).

A sul da embocadura do rio Mondego, a evolução da linha de costa foi fortemente influenciada pelas intervenções antrópicas efetuadas desde meados do século passado, das quais se destacam: a construção dos molhes da embocadura (1961-1965); a extração de areia na praia da Figueira da Foz (1973-1996); dragagens da embocadura para acesso ao porto; intervenções de regularização fluvial e portuária; a alimentação artificial pontual 50 m a sul do enraizamento do molhe sul (1973-1975); a construção da defesa longitudinal aderente da Cova (1975); a construção do esporão da Leirosa (1978), do esporão da Costa de Lavos (1979) e do campo de cinco esporões da Gala-Cova (1979); e, por último, o prolongamento do molhe norte da embocadura (2008-2010).

O presente estudo tem como objetivo a avaliação, com base em modelação numérica, do efeito da última intervenção na evolução da linha de costa do trecho entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis, numa extensão de aproximadamente 30 km.

2. DADOS E MÉTODO

A correta caracterização do comportamento e fenómenos inerentes à dinâmica litoral da zona de estudo é fundamental na construção de um modelo que reproduzirá a realidade com fiabilidade. O modelo conceptual adotado foi definido de acordo com o funcionamento e requisitos do modelo numérico de evolução da linha de costa (1-linha), *LITLINE*. Este modelo é parte integrante do sistema de modelos numéricos determinísticos *LITPACK*, e tem por base o modelo bidimensional no plano vertical (2D-V) *LITDRIFT*, para cálculo do transporte sedimentar na componente longitudinal, e o modelo numérico intra onda *Quasi*-3D *LITSTP*, que descreve os processos de transporte não estacionários ao longo do ciclo da onda (DHI, 2014).

2.1. Modelo conceptual

O modelo numérico utilizado calcula o transporte sedimentar com recurso a tabelas de transporte previamente criadas com a ferramenta *LINTABL*. O controlo da deriva litoral nas fronteiras resulta da alteração do parâmetro rugosidade de fundo, k, para ajuste da capacidade de transporte determinada pelo modelo *LITDRIFT* à capacidade efetiva admitida pelo modelo.

Na fronteira a norte, delimitada pela embocadura do rio Mondego, a entrada de sedimentos na zona de estudo é condicionada pelos efeitos de retenção de areia no molhe norte, operações de dragagem na embocadura e extrações e alimentações de areia nas praias adjacentes.

Na fronteira sul, delimitada pela embocadura do rio Lis, é admitido o estado de equilíbrio dinâmico (Santos *et al.*, 2014), considerando-se a existência de disponibilidade sedimentar.

No perfil de praia representativo, atribuíram-se as cotas de -11.60 m ZH ao início da zona ativa do perfil, com uma extensão de aproximadamente 1500 m; 12 m ZH ao topo da duna; e 5 m ZH à berma da praia, resultando uma altura ativa de 16.6 m.

A orientação média da linha de costa da unidade fisiográfica em estudo foi considerada a orientação do alinhamento médio da isolinha do NMM em 2011, 19.6°N, coincidente com a direção da linha de base (*baseline*) adotada como referencial longitudinal, com um passo espacial de 10 m.

2.2. Linhas de costa

O traçado e posição da linha de costa dependem essencialmente de fatores como o forçamento oceanográfico, os sedimentos, o contexto geomorfológico e a intervenção antrópica.

As linhas de costa utilizadas para calibração e validação, denominadas LC medidas, foram extraídas de modelos digitais de terreno construídos a partir de levantamentos topográficos do INAG (assim designado na altura), para os anos 1996 e 2001 (julho), e de levantamentos topo-hidrográficos da DGT, para os anos de 2008 e 2011 (Oliveira, 2015).

2.2. Calibração, validação e previsão

A calibração do modelo consiste na determinação do transporte sedimentar (implicitamente do valor do parâmetro de calibração k) na zona de estudo, que permite a melhor simulação das tendências evolutivas reais da linha de costa, ou seja, o melhor ajuste entre LC medidas e numéricas. Foram consideradas as características de topo-hidrografia e sedimentologia adotadas por Oliveira (2016), salientando-se o perfil transversal de praia representativo, designado P7 por Oliveira (2015) e o diâmetro mediano dos sedimentos, d_{50}=0.30 mm. Da implementação deste processo no período 1996-2001, resultou o valor de k=0.0050 m, que foi validado para o período 2001-2008, mantendo constantes os restantes parâmetros adotados na elaboração do modelo conceptual.

O período de previsão considerado neste estudo, 2008-2022, teve por base o pressuposto adotado por Teixeira (2006): o processo de acumulação na praia da Figueira da Foz devido ao prolongamento do molhe estabilizará em, aproximadamente, 12 anos após a conclusão das obras exteriores do porto, à semelhança do que se verificou aquando da sua construção em 1965.

Após o modelo calibrado e validado, procedeu-se à simulação de dois cenários: o cenário real em que foi construído o referido prolongamento e um cenário hipotético sem a construção do mesmo. A avaliação do impacte do prolongamento do molhe baseia-se na comparação destes dois cenários. Para ambos, considerou-se o clima de agitação marítima verificado nos 15 anos anteriores à conclusão do prolongamento e previsões de maré astronómica.

Para análise de resultados recorreu-se à partição do trecho litoral em estudo em cinco sub-trechos, condicionados pelas estruturas transversais existentes, construídas ou naturais: 1) do molhe sul da embocadura do rio Mondego ao último esporão do campo de esporões da Gala-Cova (EGC); 2) do último esporão do campo de EGC ao esporão da Costa de Lavos (ECL); 3) do ECL ao esporão da Leirosa (EL); 4) do EL ao promontório de Pedrogão; e 5) do promontório de Pedrogão ao molhe norte da embocadura do rio Lis.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Cenário de prolongamento do molhe norte

A Figura 1 apresenta as LC numéricas referentes aos anos de 2010, 2014, 2018 e 2022, resultantes das simulações de previsão para o cenário de prolongamento do molhe norte, juntamente com a LC medida em 2008, obtidas a 1 de julho dos respetivos anos.

Os resultados da evolução nos sub-trechos 1 e 2 não reproduzem corretamente a realidade devido ao afastamento entre a orientação média da LC local e a orientação média da LC para a totalidade da zona de estudo, sendo este um requisito base deste tipo de modelos (uniformidade longitudinal de morfologia). Adicionalmente, o modelo considera para os esporões introduzidos uma orientação distinta da real, uma vez que apenas requer a definição da localização do seu enraizamento e o seu comprimento, considerando-os perpendiculares à *baseline*. Este efeito é visível na Figura 1, onde os referidos sub-trechos se alinham paralelamente à *baseline* com o passar dos anos, revelando reorientações da linha de costa sem significado físico real para as estruturas implantadas no terreno.

A sotamar do ECL espera-se um comportamento alternado de erosão e acreção, com recuos e avanços máximos, 52 e 78 m, respetivamente, em 2010-2011 e 2012-2013. Nos anos seguintes prevê-se uma diminuição destes valores, com exceção do ano 2021-2022 em que se prevê um avanço de 64 m. A barlamar do EL prevê-se um comportamento inverso para os mesmos anos, com máximos avanços e

recuos de 77 e 85 m, respetivamente, em 2010-2011 e 2012-2013, e recuos até 65 m para 2021-2022, a 120 m do EL.

A mesma análise na vizinhança das restantes estruturas localizadas a sul, revela uma repetição deste comportamento a barlamar e sotamar para os mesmos anos, prevendo-se uma diminuição da intensidade dos avanços e recuos para sul, especialmente a norte da defesa longitudinal aderente localizada a barlamar do promontório de Pedrógão.

Note-se que este gradiente longitudinal do envelope de variações da LC na zona de estudo não se atribui especificamente ao prolongamento do molhe norte mas sim à resposta morfológica da unidade fisiográfica no seu todo à ação da agitação marítima.

A barlamar do molhe norte da embocadura do rio Lis, o comportamento modelado prevê uma elevada acumulação de sedimentos que não faz sentido de acordo com as características locais. De facto, é possível que tal disponibilidade de sedimentos exista, mas o modelo não simula a dinâmica resultante da dispersão causada pelo jacto de caudal líquido proveniente do rio, levando a que as previsões de evolução adjacente à embocadura não sejam válidas.

3.2. Impacte do prolongamento do molhe norte

Analisou-se, para cada ano do período de previsão, o impacte do prolongamento do molhe na amplitude da variação anual (janeiro a dezembro) da linha de costa recorrendo, como já mencionado em 2.2, à comparação de cenários com e sem prolongamento do molhe. Concluiu-se que a presença do molhe causa uma menor amplitude de variação da LC nos sub-trechos 1, 2, 4 e 5, reduzindo-a em valores médios de 12, 1, 2 e 4 m, respetivamente. A redução verifica-se nos sub-trechos referidos em 69%, 38%, 62% e 62% dos anos em estudo. No sub-trecho 3, verifica-se um aumento de 1 m na amplitude, em média, registando-se redução em apenas 23% dos anos analisados.

A Figura 2 apresenta as linhas de costa numéricas referentes ao ano de 2022 (1 julho) obtidas para os cenários com e sem o prolongamento, juntamente com a LC medida em 2008. O traçado das duas LC numéricas revela-se semelhante nos sub-trechos 3 e 4, sendo bastante próximo na vizinhança a barlamar das estruturas existentes em toda a zona de estudo, com exceção do sub-trecho 1 onde, como referido, não se considera que o modelo reproduza as tendências evolutivas reais com fiabilidade. É especialmente acentuado o efeito do prolongamento no recuo da linha de costa no ano de 2022 a sotamar do campo de EGC e do promontório de Pedrógão. Por comparação das duas LC numéricas pode afirmar-se que se espera um recuo generalizado da linha de costa, resultante do prolongamento do molhe.

A tabela I apresenta o valor médio da variação da posição da linha de costa entre 1 de julho de cada ano do período em análise, na totalidade da zona de estudo e nos sub-trechos indicados. Valores de variação negativos correspondem a recuos induzidos pelo prolongamento, sendo a intensidade da variação representada pela intensidade da cor. Estes resultados confirmam o efeito generalizado de erosão causado pelo prolongamento do molhe, com destaque para os sub-trechos 3 e 4, em que existe maior confiança nos resultados numéricos.

Uma análise mais detalhada desta grandeza no interior de cada sub-trecho revelou que a sotamar do ECL o prolongamento do molhe induzirá recuos adicionais de 2.2 m e avanços adicionais de 1.6 m, registando-se recuos consecutivos nos últimos 4 anos do período de previsão, onde se inclui o valor máximo referido. Tendencialmente, verifica-se o comportamento oposto a barlamar do EL, com

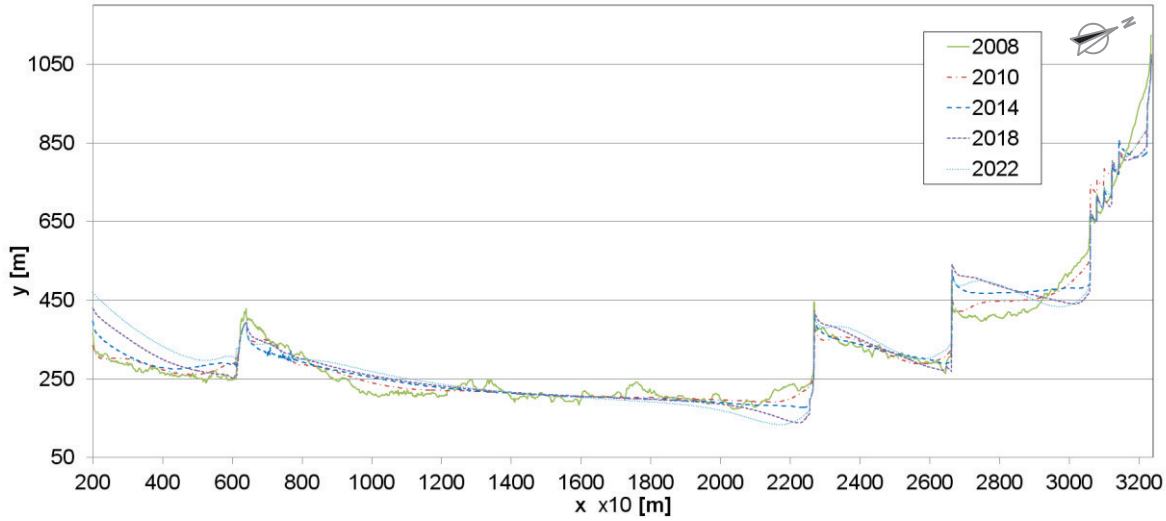


Fig. 1. Linha de costa do trecho litoral em estudo medida em 2008 e linhas de costa numéricas referentes aos anos de 2010, 2014, 2018 e 2022, obtidas para o cenário de prolongamento do molhe norte da embocadura do rio Mondego.

exceção do último ano em que se verifica novamente um incremento do recuo da LC. A sotamar deste esporão é evidente o aumento da variação da LC causado pelo prolongamento nos primeiros anos após a construção, sendo menor a variação da LC entre 2018 e 2022. O comportamento a barlamar do promontório de Pedrógão é semelhante ao previsto a barlamar do EL. A sotamar desta estrutura natural, prevêem-se avanços e recuos bastante acentuados pelo prolongamento: recuos adicionais máximos de 14.6, 21.2 e 7.7 m nos anos de 2011, 2015 e 2019, e avanços adicionais máximos de 12.2, 14.1 e 11.5 m nos anos de 2012, 2021 e 2022.

Tabela I – Valor médio da variação da posição da linha de costa, entre 1 de julho de cada ano do período em análise, na zona de estudo e nos sub-trechos indicados.

	Valor médio da variação da posição da LC [m]					
	Zona de	Sub-trecho				
Período	estudo	1	2	3	4	5
2010-2011	-0.2	4.1	-3.1	0.0	0.0	0.0
2011-2012	-0.8	-11.6	1.3	0.4	0.1	-3.7
2012-2013	-0.6	1.8	-1.9	-0.8	-0.2	-1.2
2013-2014	0.1	1.9	-0.4	0.0	0.1	0.0
2014-2015	-0.1	2.1	-1.0	-0.3	0.1	-0.4
2015-2016	-0.7	-4.3	-0.3	0.0	-0.2	-2.4
2016-2017	-0.9	-10.0	0.4	-0.3	-0.2	-2.4
2017-2018	-1.0	-7.2	0.0	-0.3	-0.1	-4.1
2018-2019	-0.8	-5.1	-0.5	-0.3	-0.3	-1.9
2019-2020	0.5	18.9	-3.2	-0.3	0.2	0.4
2020-2021	-0.1	9.1	-4.8	-0.4	0.1	1.3
2021-2022	-0.3	4.8	-4.1	-0.3	0.0	0.6
2010-2022	-4.9	4.5	-17.6	-2.6	-0.5	-13.7

4. CONCLUSÕES

Este estudo conclui sobre o efeito erosivo resultante do prolongamento do molhe norte da embocadura do rio Mondego nas praias adjacentes a sul. Este efeito terá intensidade variável ao longo da zona de estudo, mantendo, no entanto, a tendência de recuo generalizado da linha de costa.

Confirma-se também a fragilidade de um modelo deste tipo na previsão da evolução da linha de costa em trechos com alinhamentos desviantes da direção da *baseline*.

Verifica-se que as zonas mais afetadas pela carência sedimentar resultante deste prolongamento se situam a sotamar das estruturas construídas, sendo ainda evidente o seu efeito a sotamar do promontório de Pedrógão, aproximadamente a 27 km do molhe.

REFERÊNCIAS

DHI. (2014). *LITPACK* - An Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics - A Short Description. Danish Hydraulic Institute. Copenhaga, Dinamarca.

Oliveira, F.S.B.F. e Brito, F.A. (2015). Evolução da morfologia costeira a sul da embocadura do rio Mondego, de 1975 a 2011. *VIII Congresso PGZCPEP*. Universidade de Aveiro, Portugal, CD-ROM, 15 pp.

Oliveira, J. N. C., Oliveira, F. S. B. F. e Teixeira, A. T. (2016). Agitação marítima e potencial de transporte sedimentar longitudinal a sul da embocadura do rio Mondego. *IV Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, IH, Lisboa, Portugal.

Santos, F. D., Lopes, A. M., Moniz, G., Ramos, L. e Taborda, R. (2014). Gestão da Zona Costeira – O Desafio da Mudança. Grupo de Trabalho do Litoral. 242pp.

Teixeira, A. T. (2006). Evolução da linha litoral a sul do porto da Figueira da Foz – Estudos em modelo matemático. CEHIDRO. Lisboa, Portugal.

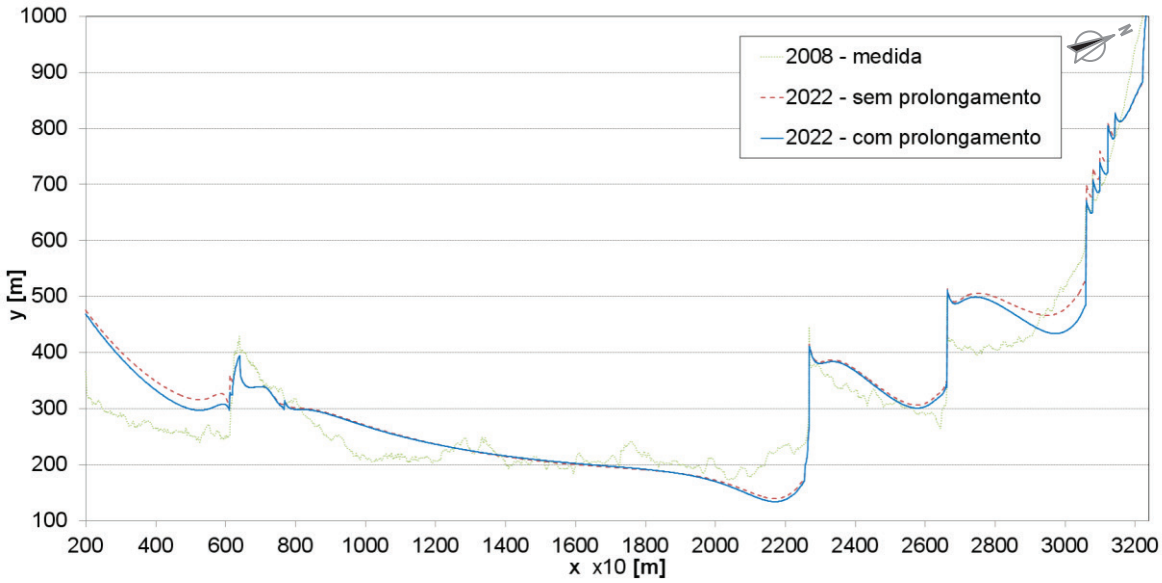


Fig. 2. Linha de costa do trecho litoral em estudo medida em 2008 e linhas de costa numéricas referentes ao ano de 2022, obtidas para os cenários com e sem prolongamento do molhe norte da embocadura do rio Mondego.

Estudo da dinâmica sedimentar da plataforma continental do Algarve utilizando areias marcadas

I. Bosnic (1,2), J. Cascalho (1,3), R. Taborda (1), T. Drago (4), M. Rosa (4), J. Hermínio (1)

(1) Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal.

(2) Instituto Hidrográfico (IH), 1249-093 Lisboa, Portugal.

(3) Museu Nacional de História Natural e da Ciência (MUHNAC-UL), 1250-102, Lisboa, Portugal.

(4) Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), 8700-305 Olhão, Portugal.

Resumo: A plataforma continental desempenha um papel fundamental na dinâmica sedimentar costeira ao fazer a ligação entre a praia e o domínio oceânico. Este trabalho tem por objetivo estudar a dinâmica sedimentar deste ambiente ainda pouco conhecido. Nesse sentido, foi realizada uma experiência com areias marcadas ao largo de Tavira, que envolveu a injeção de 400 kg de areia marcada com tinta fluorescente a 14 m de profundidade. A dispersão do traçador foi monitorizada através de 4 campanhas de mar, realizadas ao longo de 1 ano, tendo sido recolhido um total de 162 amostras. Através do cálculo da posição dos respectivos centros de massa, foi possível identificar um transporte sedimentar com resultante dirigida para SW. No período de estudo, o centro de massa do traçador deslocou-se 23 m paralelamente à costa e 10 m em direção a terra. As taxas de transporte sedimentar estimadas evidenciam um transporte resultante de reduzida magnitude, compatível com a presença de sedimentos relíquia.

Palavras-chave: transporte sedimentar, areias fluorescentes, Tavira.

1. INTRODUÇÃO

A dinâmica sedimentar da plataforma continental, especialmente no domínio adjacente ao litoral, apresenta grande relevância para o balanço sedimentar costeiro. No entanto, este é um domínio onde a dinâmica sedimentar é ainda muito pouco conhecida, principalmente a escalas temporais alargadas (sazonal ou superior). Este trabalho visa suprir esta lacuna do conhecimento através da realização de uma experiência com traçadores fluorescentes monitorizados ao longo de um ano na plataforma continental.

A área de estudo localiza-se ao largo de Tavira (Portugal), no flanco oriental do sistema de ilhas-barreira da Ria Formosa (Fig. 1). Até 10 m de profundidade o sedimento de fundo é dominado por areia fina a média. Entre os 10 e os 15 m a fração cascalhenta representa entre 10 a 30 % do sedimento total; a componente biogénica representa entre 30 a 45% (Rufino *et al.*, 2008; Rosa *et al.*, 2013). Deve ser referido que grande parte destas partículas apresenta uma pátina avermelhada, indicadora de condições de reduzida mobilidade e de fornecimento diferentes das atuais (Dias, 1987).

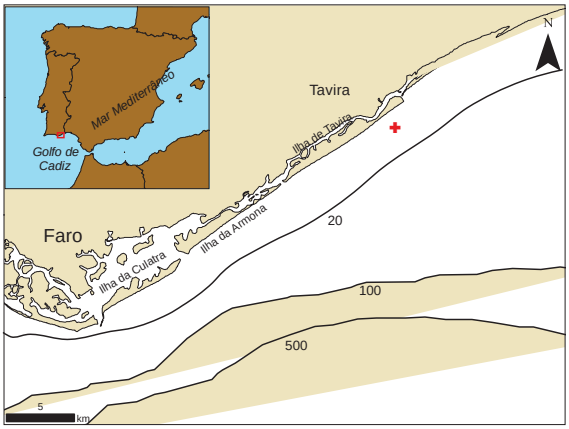


Fig. 1. Área de estudo. O símbolo vermelho indica o local da experiência com areias marcadas.

2. MÉTODOS

A areia a ser marcada foi previamente recolhida da barra de Tavira por uma empresa de extração (A. Santos e Brito do Vale, Lda.). O processo de marcação iniciou-se com a lavagem de aproximadamente 400 kg de areia que posteriormente foi seca ao ar livre. Após este processo, a areia foi pintada com tinta fluorescente (6 partes de tinta para 4 partes de diluente não-celuloso) numa betoneira para otimizar o processo e evitar a agregação do sedimento. A comparação entre a distribuição granulométrica do sedimento local e da areia marcada encontra-se representada na Fig. 2, verificando-se que o traçador representa a fração mais móvel do sedimento local.

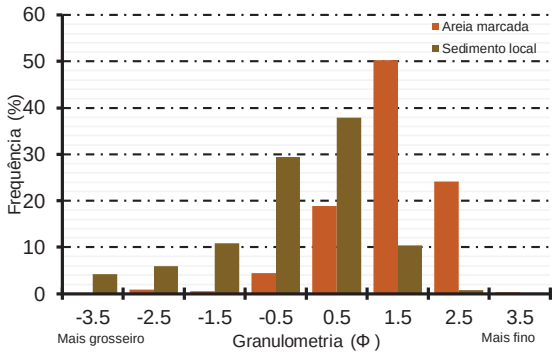


Fig. 2. Caracterização textural da areia marcada e do sedimento local.

A injeção da areia marcada ao largo da ilha de Tavira a uma profundidade de 14 m (nível médio do mar – NMM) foi realizada com o auxílio de mergulhadores. A monitorização do deslocamento do traçador foi feita através da recolha de sedimento superficial de fundo utilizando uma draga do tipo *van Veen* de 0.05 m^2 de área. Foram realizadas 4 campanhas de mar ao longo de 1 ano, cujas datas e número de amostras estão descritos na Tabela I.

Tabela I. Número de amostras de fundo recolhidas nas 4 campanhas de mar realizadas.

Campanha ID	Data	Número de amostras
C1	03-06-2014	28
C2	12-11-2014	37
C3	13-03-2015	65
C4	02-06-2015	32

As malhas de amostragem, previamente definidas com resolução mínima de 10 m, devido às condições de mar, resultaram em malhas irregulares com resolução média de 6 m a volta do ponto de injeção, a partir das quais foi recolhido um total de 162 amostras (Fig. 3). A técnica de amostragem baseou-se no método de integração no espaço, onde o comportamento da nuvem de traçador é analisado no tempo e no espaço (Madsen, 1987).

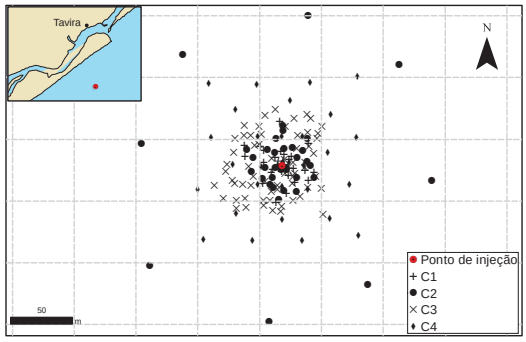


Fig. 3. Malhas de amostragem das 4 campanhas de mar.

Em laboratório, as amostras foram previamente visualizadas com luz ultravioleta (UV) para a deteção e seleção de amostras com grãos marcados. As amostras selecionadas foram então lavadas, secas, homogeneizadas e espalhadas sobre um tabuleiro com uma dimensão de 39 por 29 cm a fim de serem fotografadas. As fotografias foram captadas sob luz UV com o auxílio de uma máquina fotográfica com uma resolução de 18 megapixéis.

A relação entre a concentração de grãos marcados detetados nas imagens e a concentração de massa do traçador foi estimada em laboratório utilizando diluições-padrão para injeções sucessivas de uma massa conhecida de traçador (Fig. 4).

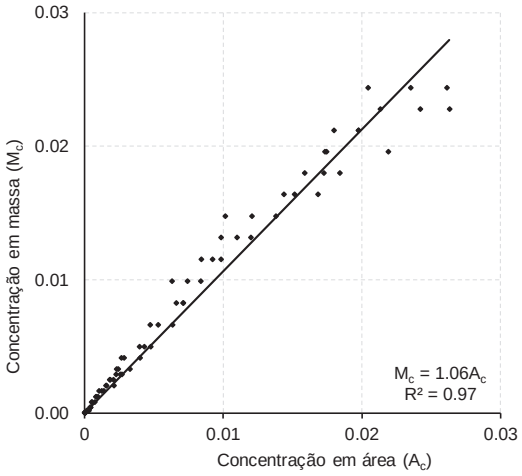


Fig. 4. Razão entre a massa de traçador e a massa total da amostra (M_c) versus a razão entre a área de grãos marcados e área total da imagem (A_c).

O peso total do traçador recuperado foi calculado através do produto entre a concentração do traçador em massa (estimada em cada amostra), a sua área representativa (calculada através dos polígonos Thiessen) e a espessura da camada de mistura. A profundidade da camada de mistura foi estimada através do cálculo da tensão de corte junto ao fundo de acordo com o método descrito por Harris e Wiberg (1997).

A taxa de transporte sedimentar (Q_t - m^3/m/s) foi calculada com base na velocidade média ($\overline{V}$) do centro de massa do traçador (Equação 1) por unidade de largura, multiplicada pela espessura da camada de mistura (δ_{mix}) estimada em 0.03 m (Equação 2).

$$\overline{V} = \frac{y_{cm}(t_2) - y_{cm}(t_1)}{t_2 - t_1} \qquad (1)$$

onde y_{cm} é a posição ao centro de massa (paralela ou perpendicular à costa) nos instantes inicial (t_1) e final (t_2)..

$$Q_t = \overline{V} \times \delta_{mix} \qquad (2)$$

onde δ_{mix} é a espessura da camada de mistura.

3. RESULTADOS

As taxas de recuperação do traçador variaram entre 7 e 38%. A taxa mais baixa refere-se à última campanha de mar (C4), enquanto que o valor mais elevado diz respeito à segunda campanha (C2). Os outros dois levantamentos de campo, campanhas C1 e C3, apresentaram taxas de recuperação de 18 e 10%, respectivamente.

A distribuição da concentração de grãos marcados para cada campanha de mar está representada na Fig. 5. O traçador foi detetado maioritariamente a oeste do ponto de injeção.

Na primeira campanha a concentração máxima excedeu os 40.000 grãos/m^2. As concentrações mais elevadas encontravam-se na vizinhança imediata do ponto de injeção, sendo que a maior parte se localizava a noroeste deste ponto, até uma distância de aproximadamente 35 m.

A segunda campanha revelou concentrações mais elevadas a oeste e a sudoeste do ponto de injeção, apresentando pontos com com mais de 5000 grãos/m^2.

Na terceira campanha, as concentrações variaram entre 36 e 981 grãos/m^2 encontradas a uma distância de até 45 m do ponto de injeção.

Na última campanha apenas 7 amostras apresentaram grãos marcados com concentrações entre 18 e 718 grãos/m^2.

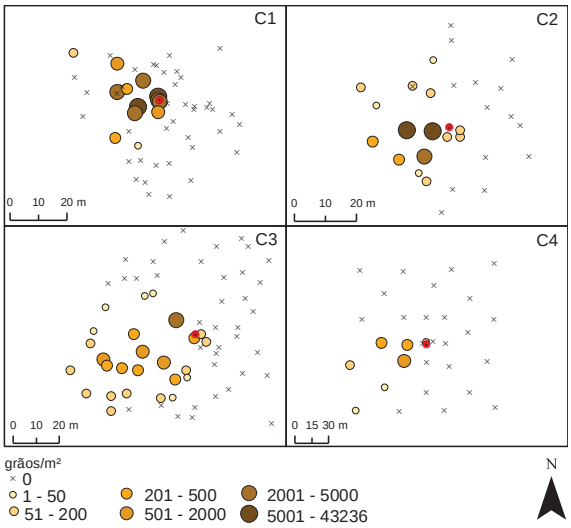


Fig. 5. Distribuição da concentração de grãos marcados para as 4 campanhas de mar.

A deslocação do centro de massa é consistente ao longo do período de monitorização, sendo maioritariamente dominada pela componente longilitoral dirigida para sudoeste (Fig. 6).

Nas 3 primeiras campanhas de mar, os resultados revelaram a predominância de uma deslocação longilitoral com velocidades médias de 0.08, 0.02 e 0.10 m/dia, respetivamente. Na última campanha os resultados mostram a existência de um deslocamento longilitoral de 0.04 m/dia enquanto que a componente perpendicular (em direção a terra) se revelou mais elevada.

As taxas de transporte sedimentar estimadas mostram a predominância do transporte longilitoral com taxas que variam de 0.87 a 3.54 m^3/m/s dirigidas para sudoeste, enquanto que as taxas de transporte perpendicular à costa variam entre 0.44 e 1.96 m^3/m/s (Tabela II).

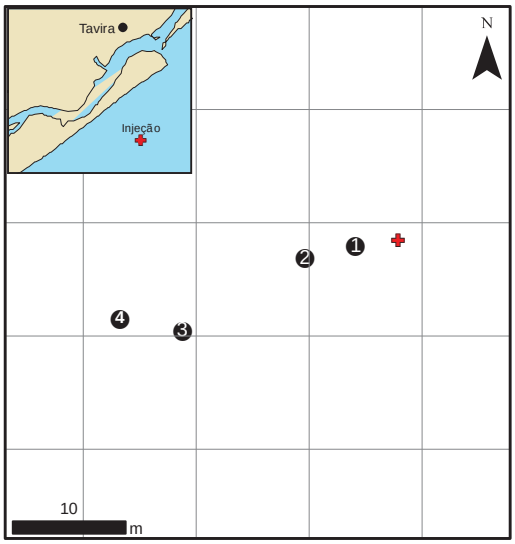


Fig. 6. Deslocamento do centro de massa do traçador ao longo de um ano. Cruz vermelha marca o ponto de injeção e os círculos pretos a localização do centro de massa referente às 4 campanhas de mar.

Tabela II. Descrição sumária dos resultados relativos às campanhas C1 a C4 no que diz respeito às taxas de recuperação e taxas de transporte paralelo (Qas) e perpendicular (Qcs) à costa.

Campanha	Taxa de recuperação (%)	Q_{as} (10^{-8} m^2.s^{-1})	Q_{cs} (10^{-8} m^2.s^{-1})
C1	18	-2.63	1.81
C2	38	-0.87	0.44
C3	10	-3.54	0.75
C4	7	-1.33	1.96

4. DISCUSSÃO

Para as 4 campanhas de mar as taxas de recuperação do traçador variaram entre 7 e 38 %. Estes valores, que podem ser considerados relativamente baixos quando comparados com os obtidos em ambiente de praia (Black *et al.*, 2007), mas são semelhantes aos obtidos por Smith *et al.* (2007) na plataforma continental interna, onde as taxas de recuperação reportadas são entre 3.9 e 15 %. As baixas taxas de recuperação podem ser atribuídas a diversos fatores: 1) à geometria da malha de amostragem (baixa resolução espacial e distribuição não uniforme); 2) ao enterramento do traçador, e; 3) a elevadas taxas de transporte sedimentar suscetíveis de transportar o

traçador para fora dos limites da malha de amostragem. Uma vez que a profundidade de amostragem excede a espessura de mistura e as concentrações máximas do traçador se encontram sistematicamente no interior da malha de amostragem os fatores 2) e 3) foram descartados. Conclui-se assim que as reduzidas taxas de recuperação estão provavelmente relacionadas com a geometria da malha de amostragem. Esta encontrou-se condicionada pelas restrições operacionais inerentes ao trabalho de mar.

A magnitude de deslocamento do traçador variou entre 0.02 e 0.10 m/dia a que correspondem taxas de transporte anuais médias entre 0.61 m^3/m/ano e 0.31 m^3/m/ano paralelamente e perpendicularmente à costa, respectivamente.

As estimativas de transporte foram comparadas com as que constam nos escassos trabalhos que quantificam o transporte sedimentar na plataforma a escalas temporais alargadas (sazonal/anual). Por exemplo van Rijn (1997), no Mar do Norte, estimou a 20 m de profundidade, a partir de modelação, valores de transporte entre 0 e 15 m^3/m/ano e 15 e 60 m^3/m/ano perpendicularmente e paralelamente à costa. Por sua vez Kleinhans e Grasmeijer (2006) apresentam valores de transporte cerca de cinco vezes inferiores para condições idênticas. Patterson (2012) com base num modelo empírico suportado em dados da Gold Coast (Austrália), estimou um transporte transversal à costa de cerca de 13 m^3 /m/ano a 14 m de profundidade.

A velocidade média de transporte apresenta uma magnitude de 0.01 a 0.1 m/dia, várias ordens de grandeza inferior àquela que foi observada nas praias adjacentes (10 a 100 m/dia), sujeitas a condições de agitação semelhantes (Ciavola *et al.*, 1997). Este facto é compatível com a presença de partículas relíquia observados nesta zona da plataforma. A reduzida mobilidade sedimentar observada neste estudo tem implicações importantes no que diz respeito à gestão dos recursos sedimentares da plataforma.

5. CONCLUSÕES

Este estudo, baseado numa experiência com areias marcadas, apresenta estimativas diretas inéditas do transporte sedimentar à escala sazonal. Os resultados indicam um transporte de magnitude muito reduzida, o que é compatível com o caráter relíquia de uma fração significativa das partículas sedimentares.

Agradecimentos

Este trabalho é uma contribuição do projeto SHORE (Shoreface morphodynamics: an integrated approach — PTDC/MAREST/3485/2012) financado pela fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT). Os autores agradecem ao piloto da embarcação Pagrus, Isidoro Costa, ao Ginásio Clube Tavira, à Udiving, ao Erwan Garel e ao Óscar Ferreira pelo suporte logístico fundamental dado na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Black, K., Athey, S., Wilson, P., Evans, D. (2007). En: P. S., Balson, M. B. Collins, (eds), Coastal and Shelf Sediment Transport. Geological Society of London, Special Publications, 274, 73-91.

Ciavola, P., Taborda, R., Ferreira, O., Dias, J.A. (1997). Field measurements of longshore sand transport and control processes on a steep meso-tidal beach in Portugal. Journal of Coastal Research, 13, 1119–1129.

Dias, 1987. Dinâmica Sedimentar e Evolução Recente da Plataforma Continental Portuguesa Setentrional. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Lisboa, Lisboa, 384 p.

Harris, C.K., Wiberg, P.L. (1997). Approaches to quantifying long-term continental shelf sediment transport with an example from the Northern California STRESS mid-shelfsite. Continental Shelf Research, 17, 1389–1418.

Kleinhans, M.G., Grasmeijer, B.T. (2006). Bed load transport on the shoreface by currents and waves. Coastal Engineering, 53, 983–996. doi:10.1016/j.coastaleng.2006.06.009.

Madsen, O.S. (1987). Use of Tracers in Sediment Transport Studies. Proceedings of Coastal Sediments 49, 424-435.

Patterson, D.C. (2012). Shoreward Sand Transport Outside The Surfzone, Northern Gold Coast, Australia, in: Proceedings of the 33rd International Conference on Coastal Engineering 2012, ICCE 2012, 1–15.

Rosa, F., Rufino, M.M., Ferreira, O., Matias, A., Brito, A.C., Gaspar, M.B. (2013). The influence of coastal processes on inner shelf sediment distribution: The Eastern Algarve Shelf (Southern Portugal). Geologica Acta, 11, 59–74. doi:10.1344/105.000001755.

Rufino, M.M., Gaspar, M.B., Maynou, F., Monteiro, C.C. (2008). Regional and temporal changes in bivalve diversity off the south coast of Portugal. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 80, 517–528. doi:10.1016/j.ecss.2008.09.014.

Smith, S.J., Marsh, J., Puckette, T. (2007). Analysis Of Fluorescent Sediment Tracer For Evaluating Nearshore Placement Of Dredged Material, in: Proceedings of 18th World Dredging Congress, World Organisation of Dredging Association, 1345-1358.

Van Rijn, L.C. (1997). Sediment transport and budget of the central coastal zone of Holland. Coastal Engineering, 32, 61-90.

Obras de contenção do enchimento artificial da Praia da Nicha, Luanda – Angola

M. Lemos (1), L. Veiga (2), B. Caldas (3) e R. Bonanata (4)

(1) Instituto Hidrográfico – Escola de Hidrografia e Oceanografia, R. das Trinas nº 49 Lisboa, moisesdelemos@gmail.com.

(2) Instituto Hidrográfico – Divisão de Hidrografia.

(3) Infinito Ingenieria.

(4) OCP | Engenharia Oceânica, Costeira & Portuária.

Resumo: A Praia da Nicha, localizada no interior da Baía do Mussulo no município de Luanda – Angola, passou por um recente alargamento da faixa de areia (engordamento) por transporte de material resultante de processos de dragagem (dragagem hidráulica). O engordamento artificial da praia gerou uma nova configuração da linha de costa, com consequente tendência de retorno à condição natural por perda de sedimento, através de transporte longitudinal e transversal. Com o objetivo de diminuir a perda de sedimentos e reduzir, ou até eliminar, a frequência de manutenções periódicas é apresentada uma solução estrutural de contenção e estabilização deste troço da costa. O conceito adotado levou em consideração o facto desta praia possuir vocação turística e que uma faixa de areia com dimensão suficiente deveria ser criada para proporcionar espaço aos seus utilizadores. Assim, adotou-se o conceito de estabilização baseado na criação de "praias de enseada", conhecidas também como "praias encaixadas" (*pocket beaches*).

Palavras-chave: Obras de contenção, enchimento artificial da praia, Baía do Mussulo, Luanda – Angola.

1. INTRODUÇÃO

Pretende-se descrever o estudo que serviu de base à obra realizada em 2014 na Praia da Nicha, onde foram construídas estruturas de contenção e estabilização do alargamento artificial da praia. Para tal, foram analisados os subsídios necessários e o correto dimensionamento das estruturas, e aplicado um modelo empírico como solução técnica e economicamente viável, possibilitando prever a resposta da linha de costa frente à implantação dessas estruturas.

O estudo passou pela definição do número de estruturas necessárias e a melhor relação entre a distância entre cabeços e a distância à linha de costa, por forma a garantir a melhor *performance* em termos de capacidade de manutenção de uma praia estável, com perda mínima de sedimentos.

Do projeto resultaram quatro relatórios, que neste artigo constituem capítulos, apresentados de uma forma resumida. São eles:

- Estudo de ondas;
- Alternativas do conceito das praias;
- Modelação morfodinâmica nas proximidades da área de intervenção, e
- Dimensionamento das estruturas de contenção.

Não foi informada a procedência do material utilizado para o enchimento, nem o seu volume.

1.1. Área de Estudo

O Mussulo é um banco de areia com cerca de 30 km de comprimento formado pelos sedimentos do Rio Kuanza, na costa sul de Luanda, em Angola.

A restinga do Mussulo abriga a Baía do Mussulo onde se encontram três ilhas, sendo a ilha dos Padres a maior e mais conhecida. A Praia da Nicha está localizada na porção nordeste da Baía do Mussulo, conforme apresentado na Figura 1.

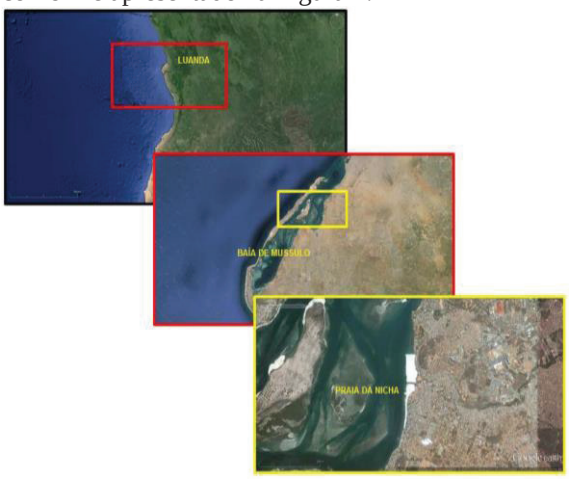


Fig. 1. Localização da área de estudo. Praia da Nicha, situada no interior da Baía do Mussulo, Luanda. Fonte: Google Earth.

2. ESTUDO DE ONDAS

Consistiu na aplicação e apresentação dos resultados da modelação numérica dos processos de propagação em águas rasas, geração de ondas pelo vento e análise estatística de valores médios e extremos, com o objetivo de estimar a onda de projeto e dar os subsídios necessários ao correto dimensionamento das estruturas costeiras de contenção da Praia da Nicha.

Para a geração de dados de onda ao largo da Baía do Mussulo, foi utilizado o modelo WAVEWATCH III – WWIII (Tolman, 2009), desenvolvido pelo *National Centers for Environmental Prediction (NCEP/NOAA).* Para a propagação em águas rasas e geração de ondas pelo vento, foi implementado o modelo SWAN, cujo código foi incorporado dentro do pacote de modelação numérica DELFT3D-WAVES, desenvolvido pela Deltares, na Holanda. O modelo SWAN permite obter estimativas do espectro de ondas em áreas costeiras, lagos, e estuários.

As ondas mais frequentes em águas profundas são provenientes de SSW e SW, seguidas pelas de S e WSW. As ondas mais energéticas ocorrem com maior frequência de SSW. Os períodos de onda com maior frequência de ocorrência variam entre 12 s e 14 s.

Os ventos predominantes são provenientes de SSW (23,12 %) e SW (17,92 %).

As ondas provenientes de águas profundas atingem a área de projeto com alturas inferiores a 0,1 m. Assim, para o dimensionamento estrutural, foram analisadas somente as séries de dados de ondas geradas pelo vento.

3. DESENHO DAS PRAIAS

Para este estudo foi utilizado o método proposto por Gonzalez e Medina (2001), implementado através da ferramenta computacional SMC (Sistema de Modelado Costero), desenvolvida pelo *Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C.) da Universidad de Cantabria e Dirección General de Costas do Ministerio de Medio Ambiente de Espanha*, a qual faz parte de um sistema denominado *Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral.*

O uso de quebra-mares para criação e apoio de praias de enseada em equilíbrio estático é uma alternativa efetiva e amplamente utilizada em todo o mundo, para garantir a contenção e estabilização de enchimentos de praia.

Com o uso de um conjunto de quebra-mares, formando praias de enseada, pretende-se aumentar a vida útil do aterro, criar espaço de recreio, criar habitats para pássaros e animais marinhos e garantir proteção às infraestruturas urbanas, face à ação das ondas e marés.

O principal inconveniente na adoção deste tipo de intervenção costeira é o bloqueio parcial ou completo de sedimentos nos compartimentos criados, o que pode acarretar em *déficit* de material nas praias adjacentes localizadas a sotamar das estruturas (na direção do transporte longitudinal de sedimentos).

Este tipo de solução de engenharia é muito utilizado em áreas costeiras recreativas, frente a estruturas turísticas. Exemplos da sua aplicação são apresentados na Figura 2.



Fig. 2. Exemplos de aplicação de estruturas de contenção e estabilização de praias – Lake Forest Beach, Illinois, EUA(esq.) e Toronto, Canadá (dir.). Fonte:Google Earth.

Para o desenho funcional deste tipo de composição, uma regra empírica simples a ser seguida é que a linha de baixa-mar média (MLW) deverá estar localizada a um terço de distância da abertura entre os cabeços. Na Figura 3, a abertura, G, é a distância entre cabeços de estruturas adjacentes (linha de controle). A linha de baixa-mar média é estimada como sendo paralela à linha de controle, localizada a uma distância $G/3$ em direção a terra.

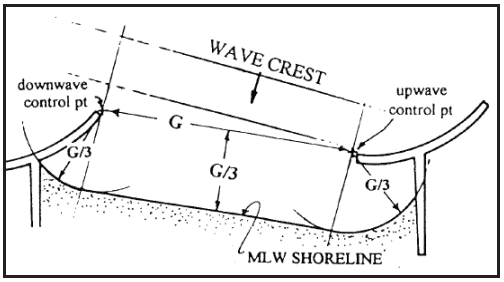


Fig. 3. Linha de costa prevista, segundo a "regra de um terço" proposta por Bodge (1998). Fonte: Bodge, K. R., 1998.

O comprimento total da linha de costa a ser estabilizada, L, é composto por n troços de praia com abertura G e $n+1$ estruturas com largura de cabeça H (Fig. 4); ou seja, $L = n(G+H)$. No mínimo, H deve ser suficientemente largo para garantir que a linha de baixa-mar média alcance a cabeça da estrutura. Seguindo a "regra de um terço", isso requer que $H = 2(G/3)$.

Projetos típicos de estabilização de praia requerem que a linha de preia-mar média (MHW) também alcance a cabeça da estrutura, fornecendo área de praia seca, utilizável atrás das estruturas. Isso requer $H = 2(G/3 + X)$, onde X é a distância horizontal entre a linha da baixa-mar média e o contorno de elevação de interesse, ou seja, $H = 2G/3 + 2X)$,

onde $X \geq 0$. Assim, o número de troços de praia requeridas é $n = L(5G/3 + 2X)$.

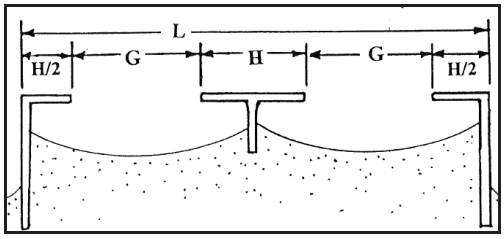


Fig. 4. Comprimento total da linha de costa a ser estabilizada, L, composto por n troços de praia com abertura G e n+1 estruturas com largura de cabeça H. Fonte: Bodge, K. R., 1998.

As relações supracitadas representam uma família de soluções a partir das quais o número de troços de praia, n, pode ser selecionado em função da largura da abertura desejada, G. Obviamente, para manter a berma da praia na posição objetivo, maiores aberturas (menos troços) requerem maiores larguras de cabeça, localizadas mais afastadas da costa. Aberturas menores requererão menores estruturas, em maior número e construídas próximas da costa. A decisão final sobre n, H e G é influenciada pelo custo (maior número de estruturas pequenas *versus* menor número de estruturas grandes), assim como por questões arquitetónicas e paisagísticas.

3.1. Alternativas Propostas

Para que seja garantida maior estabilidade e um transporte mínimo de sedimentos ao longo da área a ser estabilizada, bem como para obter uma maior área de praia seca, foram analisadas alternativas com quebra-mares aderidos à costa, ou seja, com a formação de tômbolos. Foram apresentadas ao cliente 5 alternativas estruturais, cujos parâmetros são apresentados na Tabela I.

Tabela I. Parâmetros estruturais obtidos para as 5 alternativas estudadas.

Alternativa	Comprimento quebra-mares (m)	Abertura entre estruturas (m)	Distância da estrutura à linha de costa (m)	Número Total de estruturas
1	75	165	55	7
2	100	210	70	5
3	**50**	**90**	**30**	**11**
4	75	120	40	8
5	2x50|6x70	1x75|1x120|5x135	2x25|6x45	8

O número e o comprimento das estruturas influenciam diretamente o custo da obra e é um fator importante a ser considerado na análise comparativa das alternativas propostas.

A distância à linha de costa e/ou a profundidade de assentamento influencia diretamente o volume de rocha necessário para cada estrutura, sendo que quanto maior a distância (profundidade), maior o volume e maior o custo. De forma análoga, quanto mais distante de costa, mais longa será a plataforma de acesso para camiões e retroescavadoras na fase de construção, o que influencia a produtividade e, consequentemente, o custo final da obra.

Maior abertura entre estruturas adjacentes favorece a entrada de ondas, aumentando a dinâmica de transporte de sedimentos e tornando a praia mais sujeita a processos de rotação.

Todas as alternativas apresentadas partem da hipótese de que haverá uma estrutura de apoio na extremidade norte do aterro, na desembocadura do Rio Cambamba.

4. MODELAÇÃO MORFODINÂMICA NAS PROXIMIDADES DA ÁREA DE INTERVENÇÃO

São apresentados os resultados da aplicação de um modelo hidrodinâmico, de propagação de ondas e de morfodinâmica costeira, com o objetivo de avaliar o desempenho das estruturas propostas para contenção e estabilização da Praia da Nicha.

A alternativa selecionada para implantação (alternativa 3 da Tabela I), foi de construir 11 quebra-mares ao longo da costa, cada um com 50 m de comprimento, espaçados de 90 m entre si, a uma distância de 30 m da linha de costa inicial e numa altura de 2,5 metros do Zero Hidrográfico (ZH).

Além dos parâmetros descritos no item 2 (estudo das ondas), foi acrescentada a característica dos sedimentos colocados, bem como o seu volume (Figura 5).



Fig. 5. Amostra de material sedimentar do enchimento da Praia da Nicha, com areia grossa e fragmentos de concha.

Com o objetivo de analisar a capacidade de retenção e estabilização da Praia da Nicha através das estruturas propostas, o modelo morfodinâmico foi simulado para os períodos de 1 ano, 5 anos e 10 anos.



Fig. 6. Linha de costa inicial (azul) e as previstas a obter, após 1 ano (verde), 5 anos (amarela) e 10 anos (vermelha).

Na Fig. 6 são apresentadas as linhas de costa inicial (azul) e as previstas após 1 ano (verde), 5 anos (amarela) e 10 anos (vermelha).

No cenário concreto, o transporte residual de sedimentos dá-se de sul para norte, induzido pela incidência oblíqua das ondas na costa, e pela corrente de maré com componente residual para fora da baía.

Com a implantação das estruturas são geradas células independentes de transporte e o bloqueio total de sedimentos em cada uma dessas células (troços de praia).

A capacidade de contenção de sedimentos é evidenciada pelo facto de não haver transporte por trás das estruturas (*bypass*). Dessa forma, a praia deverá permanecer contida por alguns anos, ou mesmo décadas, necessitando de pouca, ou nenhuma, manutenção.

Os resultados da simulação da evolução da morfologia costeira mostram que, pela obliquidade da incidência das ondas na costa, as enseadas propostas irão sofrer uma pequena rotação no sentido anti-horário, de modo que a porção retilínea da praia tende a posicionar-se perpendicularmente ao fluxo médio de energia. Como consequência da variação na direção do fluxo médio de energia ao longo do trecho de enchimento, as praias localizadas mais a sul sofrem menor rotação que as praias localizadas mais a norte.

5. DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO

Como já referido, foram implementados 11 quebra-mares destacados para manter a praia em equilíbrio, juntamente com um enchimento artificial, para proporcionar uma área de praia seca e lazer para os utilizadores.

No total, foram necessárias as seguintes quantidades de material: 26.562,60 m^3 de material rochoso, 19.702,37 m^3 de material geotêxtil e 67.189,54 m^3 de material arenoso.

A seguir (Figura 7 e 8) são apresentadas as estruturas de contenção e estabilização e os resultados dos ajustes da forma, em planta de equilíbrio, estimada para a Praia da Nicha.



Fig. 7. Alternativa selecionada para a contenção e estabilização da Praia da Nicha – vista em planta - simulação.

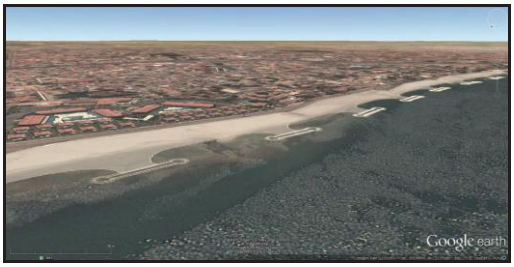


Fig. 8. Alternativa selecionada para contenção e estabilização da Praia da Nicha – vista parcial em perspectiva - simulação.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos de base a este projeto foram desenvolvidos de acordo com as normas internacionais para a conceção de quebra-mares destacados (Ciria *et al*., 2007; USACE, 2007; Smith, 1999).

Alguns critérios de projeto foram assumidos de acordo com a experiência em projetos similares.

Por motivos alheios aos responsáveis da obra, esta não cumpriu exatamente o projeto. Imagens à época da construção mostram que o enchimento da praia não foi suficiente para lhe conferir a forma de equilíbrio, em enseada. Poder-se-ia ter transportado areia da zona de maior declive para junto das estruturas.

Imagens recentes mostram que, até ao momento, as alterações no desenho das praias foram mínimas. Isto devido à baixa energia de ondas.

REFERÊNCIAS

Bodge, K. R., 1998. *"Beach Fill Stabilization with Tuned Structures: Experience in the southeastern U.S. A. and Caribbean."* ln: Coastlines, Structures and Breakwaters, N. W. H. Allsop, Ed. Thomas Telford Publishing, 1 Heron Quay, London, e. 1998; pp. 82-93.

CIRIA, CUR, CETMEF (2007). *The Rock Manual*. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). C683, CIRIA, London.

González, M., R. Medina (2001). On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches. *Coastal Engineering*, 43, 209-225.

Smith, M.R. (ed.) 1999. *Stone: Building stone, rock fill and armourstone in constructions.* Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 16.

Tolman, H.L. (2009). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14.* NOAA/NWS/NCEPOMB Technical Note 276, 194 p.

USACE, 2007. *Coastal Engineering Manual*. U.S. Army Corps of Engineers.

Modelling morphological evolution in the surrounding area of a groyne: preliminary results

Filipa S. B. F. Oliveira (1)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, foliveira@lnec.pt.

Abstract: 2D area morphological coastal models are certainly essential to analyse and predict the hydro-sedimentologic processes induced by the presence of coastal structures. In the case of groynes, commonly known processes are i) the increase of sediment transport due to streamline contraction around the tip of the groyne, ii) the loss of sediment towards offshore due to upwave rip flushes (deflection of the longshore current) caused by the blocking of the groyne and iii) the development of 2DH circulation currents and induced sediment fluxes at the lee side of the groyne due to alongshore gradients in wave setup. In this study, a model of this type was applied to a coastal area south of Mondego inlet. The results indicate that the model is capable of reproducing the morphodynamics that evolves from a uniform bathymetry to the bathymetry observed in the surrounding area of an existent groyne under typical wave conditions.

Key words: Groyne, morphodynamics, numerical modelling.

1. INTRODUCTION

The erosion problems in the Portuguese coast, namely its causes, the associated risks and the critical zones, are largely known and have benefit of considerable attention from the scientific community. These problems have particular impact in storm occasions, when occurs overwashing and inundation in maritime fronts of population settlements, where there is need to defend people and infrastructures. It is expected the aggravation of this problem due to the impact of climate changes in the coastal zone, in particular, the rise of the sea average level.

The recommended national policy for the present and future of the coastal zone is that the human occupation of the coastal zone and the activities there performed should respect and adapt to the present and future coastal dynamics (Santos *et al*., 2014). As strategies of adaptation, three types are considered: protection, relocation and accommodation. The first strategy, protection, is defined as maintaining or advancing the coastline through artificial beach nourishment, rehabilitation of dune systems, construction of artificial dunes and respective ecosystems and construction of stabilization structures like groynes, detached breakwaters and seawalls.

The north and central zones of the west coast, one of the most energetic and dynamic coasts in Europe, with high values of sediment transport capacity, about one million cubic meters per year (Santos *et al*., 2014), include several high value frontages that, for being exposed to strong wave induced longshore processes and suffering from sediment starvation, where intervened in the past, about four decades ago, through the construction of shore-normal coastline stabilization structures (groynes) and longshore defences (seawalls). However, the existing coastal defence structures are aging and the surrounding sandy beaches, which are increasingly fragile (reveal a low berm with small width, sometimes inexistent) and highly vulnerable, cannot avoid the exposure of the communities to the increased hazard. In many cases the structures no longer play the role to which they were built and their presence does not benefit the surrounding beach stability. The full extent of these defence schemes requires urgent revision in order to accomplish effective, optimized and sustainable coastal protection. The Gala-Cova, Costa de Lavos and Leirosa defended frontages, located south of Mondego river inlet, in the central west coast, are three examples of these cases. In fact, the morphodynamics of these complex type of beach-dune-structure systems is not yet fully understood. Therefore, in order to perform suitable protection interventions, it is urgent to improve the understanding of the sea-structure-sediments interaction processes and their effect on the morphologic patterns in the surroundings of the structures and on the morphodynamics of the adjacent active zones.

Analytical solutions of shoreline evolution have been a valuable method to predict the impact of a groyne in the surrounding area. A comprehensive review on the subject can be seen in Larson *et al*. (1997). Among those solutions, the most applied have been the one proposed by Pelnard-Considere (1956), which assumes a complete blockage of the longshore littoral transport until bypassing starts and proposes two governing equations for the shoreline evolution, one before and other after bypassing; and the one proposed by Larson *et al*. (1987), which

assumes sand bypassing immediately after the construction of the groyne and, thus, one governing equation for the shoreline evolution.

The state-of-art on the sea-structure-sediments interaction points out the need to pursue several investigation methods (individually and in an integrated form): theoretical process-based numerical modelling, laboratory experimentation and analytical techniques for interpretation of field and laboratory observations (Pattiaratchi *et al*., 2009; Razak *et al*., 2013; Kristensen *et al*., 2016). The present study falls within the first one. The main objective is to investigate the capacity of a 2DH (two dimensional, horizontal) process-based numerical model to simulate the morphodynamics in the surrounding area of a groyne for the hydro-sedimentologic characteristics of the study area, which is representative of Costa de Lavos and Leirosa frontages (Figure 1).

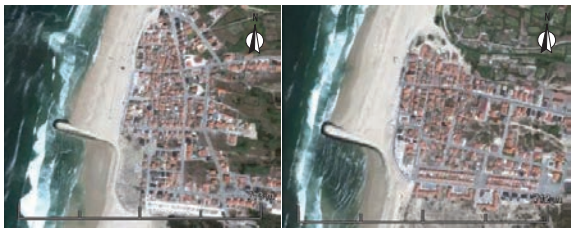


Fig. 1. Costa de Lavos (left) and Leirosa (right) maritime frontages.

2. DATA AND METHOD

2.1. Morpho-sedimentologic conditions

The sandy coastal stretch between the Mondego river inlet and the Lis river inlet evolved influenced by of a large number of human interventions since the middle of the last century (Oliveira and Brito, 2015). Within this stretch are Costa de Lavos and Leirosa, located at approximately 5.75 and 9.70 km from the south jetty of Mondego river inlet, two maritime frontages defended against erosion in 1979 and 1978, respectively, through the construction of groynes with similar structural characteristics. Based on the comparison of hydro-topographic surveys of 1975 and 2011, Oliveira and Brito (2015) quantified the impacts of the groynes in the respective surrounding active zones, which morphology was uniform alongshore prior to the interventions. In summary, the authors concluded that the impact, which was similar in both cases, was the following (Figure 2):

a) on the updrift side of the structure, a remarkable accretion of sand, associated to a 50 m advance of the shoreline (within an alongshore extension of 700 m for Costa de Lavos and half of this value for Leirosa) and an increase of the beach profile elevation (with a maximum value of about 8 m above the mean sea level (MSL) in 2011), which provided the protection of the maritime frontage against wave action;

b) on the downdrift side of the structure, immediately south of the maritime frontage, in opposition to the evolution observed updrift, an intensive erosion, associated to a 100 m retreat of the shoreline and a remarkable lowering of the frontal dune (with a maximum value of about 12 m in Costa de Lavos and 11 m in Leirosa).

The initial (t=0 s) morphologic conditions considered in this case study were based on a simplification of the morphology of the study zones in order to limit the complexity of the underlying physics. For this idealized morphology it was assumed alongshore uniformity and a three sloping beach profile: 1:77 slope in the submerged profile, between 12 m below Chart Datum (ZH) and the ZH; 1:25 slope in the beach face, assumed located between the ZH and 4 m above ZH; and 1:3.5 slope in the frontal dune face, assumed located between 4 m above ZH and the frontal dune crest, 14 m above ZH (Figure 3). The computational domain extended 1200 m in the alongshore direction and 1100 m in the cross-shore direction in a uniform Cartesian grid aligned with the cross-shore and longshore directions and resolution dx=dy=5 m. The groyne, with 20 m width and 6 m above ZH crest height, was placed in the middle of the shore boundary and extended from this boundary until 2 m below ZH at the initial bathymetry (Figure 3).

The beach-dune system sediment grain size was considered uniform with median diameter, D50, equal to 0.5 mm and density 2.65.

2.2. Hydrodynamic conditions

The following wave and sea level conditions were prescribed at the model offshore boundary to force the morphological evolution within the numerical domain:

a) the mean wave for the coastal stretch between Mondego river and Lis river inlets, with significant wave height (Hs) 2.15 m, peak period (Tp) 11.5 s and mean direction (Dir) 299.5°N (10° towards NW with respect to the shoreline normal in this stretch of the coast), as determined by Oliveira *et al*. (2016) through a statistic analysis of a validated hindcast wave parameters time series for the period 1952-2010;

b) the sea level variation between the mean high and mean low neap tide levels, 2.71 and 1.31 m above ZH (2 m below MSL at this location) respectively, as forecasted by Instituto Hidrográfico for Figueira da Foz port.

At the lateral boundaries, the model was forced with water level gradient (Neumann) boundaries.

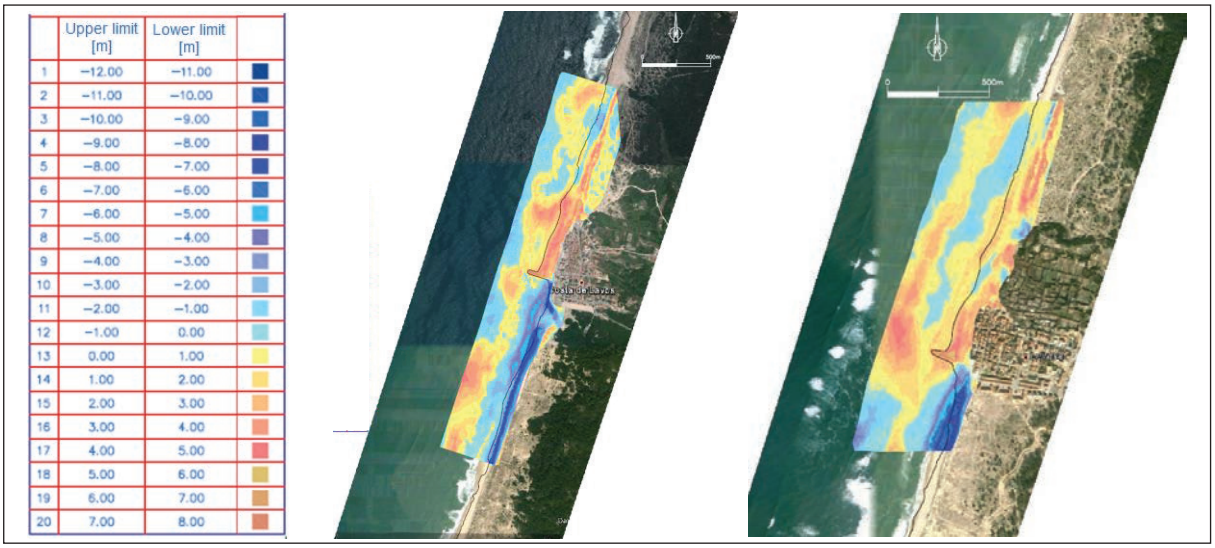


Fig. 2. Morphological evolution, between 1975 and 2011, at Costa de Lavos (left) and Leirosa (right) maritime frontages (where the black line is the MSL in 2011).

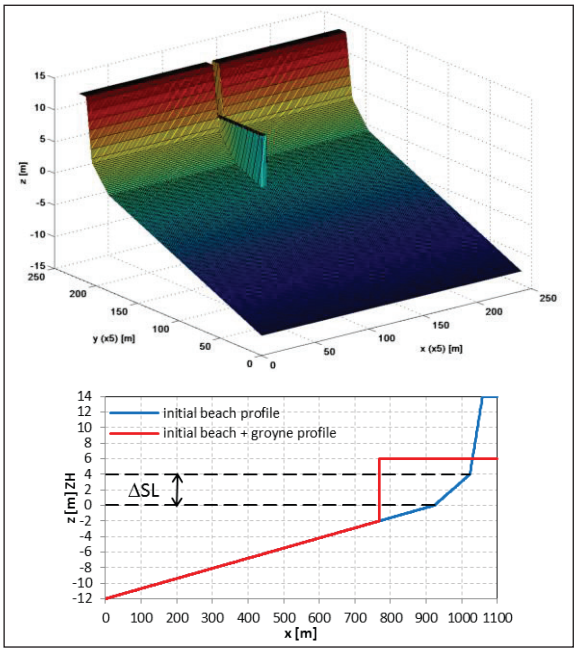


Fig. 3. Initial topo-hydrography: 3D perspective (above) and profiles (below).

2.3. Morphodynamic numerical model

The XBeach (eXtreme Beach behaviour) morphodynamic model (Roelvink *et al.*, 2010) was applied. It solves coupled 2DH equations for short wave averaged envelope propagation, non-stationary shallow water equations, sediment transport and bottom changes, for varying (spectral) wave, flow and sediment concentration boundary conditions.

The values of the model parameters applied were the ones that provided the best model calibration for a beach-dune system morphological evolution test case, which objective was to evaluate the influence of twelve calibration parameters (Oliveira, 2012).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The numerical model outcome in predicting the longshore sediment transport blocking effect of the groyne (considered as a non-erodible structure in the computations) during 30 days of local mean wave action is presented in Figures 4 and 5. The stationary wave boundary conditions produced:

a) erosion of the beach-face in almost the entire alongshore extension, with the exception of the groyne updrift and downdrift immediately adjacent zones, with the larger lowering of the beach-face (1.3 m) at 75 m from the groyne, on the lee side;

b) the formation of an alongshore bar, interrupted in the downdrift side of the groyne, with alongshore varying width and height. The bar growth rate is higher during the first 10 days and decreases in the following two periods of 10 days (Figure 4), probably until an equilibrium situation after bypassing (to be tested). The advance of the beach-face at the updrift side of the groyne associated to the sediment accumulation caused by the wave induced longshore current reached the maximum values of 55 and 35 m at the ZH and MSL isolines of seabed elevation, respectively, at the end of the 30 days. At the downdrift side of the groyne, in front of the larger lowering of the beach-face (hotspot of erosion), the 2DH circulation currents and induced sediment fluxes due to alongshore gradients in wave setup inhibited the formation of the alongshore bar;

c) local erosion at the downdrift side of the groyne caused by the increase of the sediment transport due to streamline contraction.

The above two first preliminary results resemble qualitatively the long-term morphological evolution patterns observed in the surrounding active zone of the groyne in Costa de Lavos and Leirosa described in section 2.1.

4. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

The model was capable of simulating the morphodynamics in the surrounding area of a groyne with the same characteristics as the ones of Costa de Lavos and Leirosa, for synthetized hydro-sedimentologic characteristics of the coastal area between the Mondego river and the Lis river inlets. On the overall, the model reproduced realistic main features of the morphological response in the surrounding active zone of the groyne, when the initially alongshore uniform morphology of the system was submitted to the local mean wave. Further numerical developments will be compared with laboratory experimentation and field work.

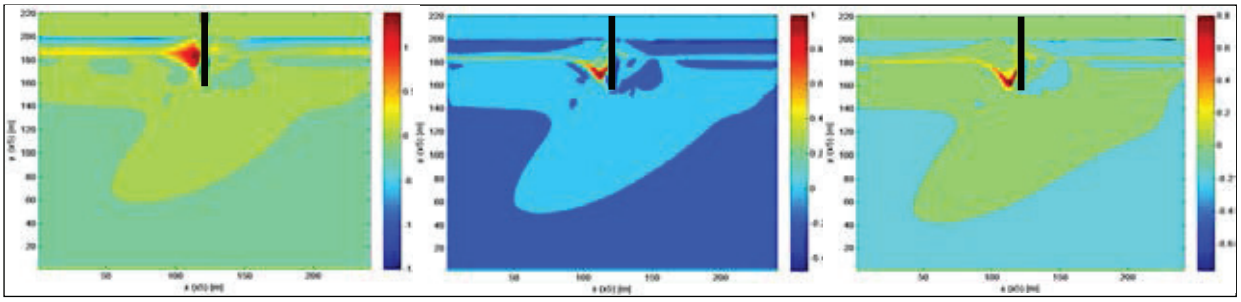


Fig. 4. Numerical morphological evolution during: the first 10 days (left), the second 10 days (middle) and the last 10 days (right).

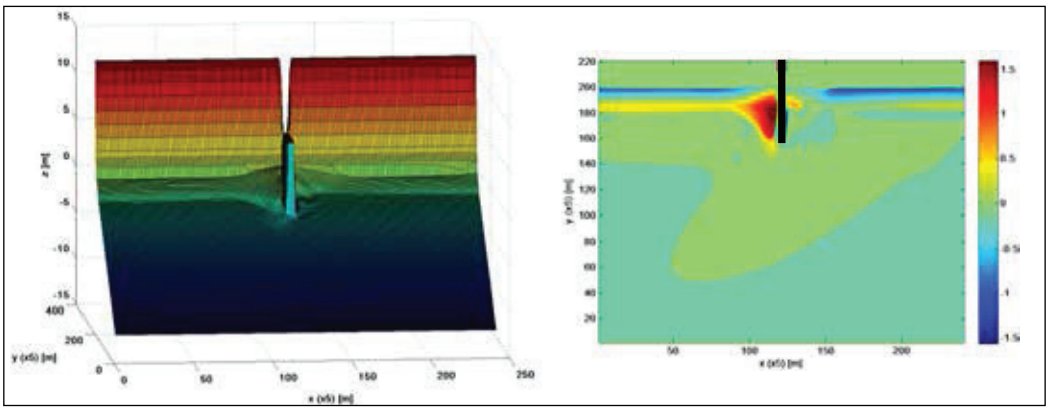


Fig. 5. Numerical morphology after 30 days (left) and numerical morphological evolution during 30 days (right).

REFERENCES

Kristensen, S.E., Drønen, N., Deigaard, R. and Fredsoe, J. (2016). Impact of groyne fields on the littoral drift: a hybrid morphological modelling study. *Coastal Engineering*, 111, pp 13-22.

Larson, M. Hanson, H. and Kraus, N.C. (1987). Analytical solutions of the one-line model of shoreline change. *Technical Report CERC-87-15*, USA-WES-CE, 72 pp.

Larson, M. Hanson, H. and Kraus, N.C. (1997). Analytical solutions of one-line model for shoreline change near coastal structures. *J.W.P.C.O.E.*, 123 (4): 180-191.

Oliveira, F.S.B.F. (2012). Erosão de dunas com os modelos XBeach e Litprof. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 12(2): 195-222.

Oliveira, F.S.B.F. and Brito, F.A. (2015). Evolução da morfologia costeira a sul da embocadura do rio Mondego, de 1975 a 2011. *VIII CPGZCPEP*, Aveiro, Portugal, CD-ROM, 15 pp.

Oliveira, J.N.C., Oliveira, F.S.B.F. and Teixeira, A.T. (2016). Agitação marítima e potencial de transporte sedimentar longitudinal a sul da embocadura do rio Mondego. *4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, IH, Lisboa, Portugal.

Pattiaratchi, C., Olsson, D. Hetzel, Y. and Lowe, R. (2009). Wave-driven circulation patterns in the lee of groynes. *Continental Shelf Research*, 29, pp 1961-1974.

Pelnard-Considere, R. (1956). Essai de théorie de l'evolution des formes de rivage en plages de sable et de galets. *4th* Journees de l'Hydraulique, *les Energies de la Mer*, Vol. III (1): 289-298.

Razak, M.S.A., Dastgheib, A. and Roelvink, D. (2013). Sand bypassing and shoreline evolution near coastal structure, comparing analytical solution and XBeach numerical modelling. *J. of Coastal Research*, SI, No. 65, pp 2083-2088.

Roelvink, D., Reniers, A., Dongeren, A., Vries, J.T., Lescinski, J. and McCall, R. (2010). XBeach model description and manual. *Report*. Unesco-IHE I. W. E., Deltares and Delft University of Technology, 106 pp.

Santos, F.D., Lopes, A. M., Moniz, G., Ramos, L. and Taborda, R. (2014). Caracterização da zona costeira de Portugal continental. *Relatório do grupo de trabalho do litoral*. Lisboa, 158 pp.

The effect of storm events in the Tagus estuarine margins

Paula Freire (1), André B. Fortunato (1), Marta Rodrigues (1), Pedro P. Santos (2), Ana Rilo (1), Alexandre O. Tavares (3)

(1) National Civil Engineering Laboratory, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisbon, Portugal, pfreire@lnec.pt.

(2) Centre for Social Studies of the University of Coimbra, Coimbra University, 3001-401 Coimbra, Portugal.

(3) Earth Science Department and Centre for Social Studies of the University of Coimbra, Coimbra University, 3001-401 Coimbra, Portugal.

Abstract: Floods in estuaries can be forced by factors associated to ocean and inland sources. In the particular case of the Tagus estuary, the water level variability is mostly driven by tides and storm surges. One of the most recent flood events with the greatest impact in this estuary occurred on February 2010 associated with the passage of the Xynthia storm by the Portuguese coast. In the present study this flood event and related impacts are characterized considering two different territorial contexts: urbanised and productive agricultural areas. The territorial characterization of the potential flooding areas for a similar event considering a sea level rise scenario, obtained through numerical modelling, shows important contrasts in flooding extensions and in the exposed elements typology. These results are relevant for flood risk management, contributing to the definition of adaptation measures to improve the capability to cope with future extreme events.

Key words: Storm surge, flood, estuaries, sea level rise, territorial context.

1. INTRODUCTION

The projected rates of global sea level rise increase the attention on the potential for flooding events in estuaries (Bilskie *et al.*, 2014). The human and physical impacts that recent events had in estuarine areas (e.g. the hurricane Sandy (2012) in New York, Aerts *et al.*, 2013), show the need to improve tools that can support emergency and land-use planning. Past flood events give a wealth of information that can be used to better understand the flooding process and its forcing mechanisms, and to validate predicting tools that can support the development of management strategies.

The Tagus estuary, located in the Portuguese west coast (Fig. 1), is one of the largest estuaries in Europe and the Portuguese most relevant estuary due to its social and economic context and environmental characteristics. Included in the Metropolitan Area of Lisbon, the estuarine water front presents strong territorial contrasts (Tavares *et al.*, 2015). The particular morphology of the estuary affects the spatial variation of the extreme water levels along the estuarine margins, and the water elevations are mainly dominated by tides and storm surges (Fortunato *et al.*, 1999, Vargas *et al.*, 2008, Guerreiro *et al.*, 2015). The conjugation of storm surge conditions and extreme high tidal levels can lead to estuarine margins flood episodes such as the one that occurred on February 15, 1941, with high human casualties and property damages (Freitas and Dias, 2013). A regional geodatabase of historical flood occurrences in the Tagus estuary indicates that the probability of occurrence of one or more flood events in one year is 26% (Rilo *et al.*, 2015). The same authors point out that these occurrences are broadly distributed along the estuarine margins between Vila Franca de Xira and Oeiras (Fig. 1). The most recent flood event with the greatest impact along both margins occurred on February 27, 2010 associated with the Xynthia storm which had impressive and tragic effects in the southwestern coast of France (André *et al.*, 2013). The storm was originated in a low-pressure zone, located in the middle of the Atlantic Ocean, which intensified in the morning of the February 27 and changed to a storm when the coastlines of Portugal and Spain where reached (Bertin, *et al.*, 2014).



Fig. 1. Study areas in the Tagus estuary (Seixal old city centre and Lezíria Grande de Vila Franca de Xira). Location of: Cascais tidal gauge and Lisboa Geofísico meteorological station.

In this paper the impacts of this storm on the estuarine margins are characterized considering two territorial contexts: urbanised (Seixal old city centre - SOCC) and productive agricultural areas (Lezíria

Grande de Vila Franca de Xira – LGVFX). Also, the potential impacts of a similar event occurrence considering a sea level rise scenario are discussed.

2. METHODS

The potential water levels forcings in the estuary were analysed based on: water level and atmospheric pressure at the Cascais tidal gauge (see Fig. 1 for locations); atmospheric pressure, wind and precipitation at the Lisboa Geofísico meteorological station; daily average discharge from the Almourol hydrometric station (75 km upstream Vila Franca de Xira); harmonic synthesis based on a regional tidal model (Fortunato *et al.*, 2016). The characterization of the event's associated impacts is based on the regional geodatabase of historical flood occurrences (Rilo *et al.*, 2015) and other available data for the study areas. The extension of the flooded and damaged areas was reconstructed using a RTK-DGPS, complemented with other information.

Territorial vulnerability (TV) was assessed at the statistical block level based on the statistical procedure followed in the Social Vulnerability Index (Cutter *et al.*, 2003), which application in the Tagus estuary is thoroughly presented in Tavares *et al.* (2015). A single metric for TV and its 8 principal components (FAC's) that characterize the main drivers of vulnerability in the study area were calculated. The LGVFX area (Fig. 1 and 3) is comprised by a single statistical block while the SOCC area (Figure 2) is comprised by 3 statistical blocks (1, 3 and 4) (Table I). From north to south, SOCC-1 covers the Seixal fluvial station and a new residential area, block SOCC-4 includes the majority of the old city center, and finally, SOCC-3 includes the southern part of the SOCC, an old industrial facility (Mundet) and new urban area that includes the city hall and the cultural centre.

Water levels were simulated with the coupled circulation-wave model SCHISM (Roland *et al.*, 2012). The model domain extends from Santarém (about 40 km upstream Vila Fanca de Xira) to the coast and has a resolution of tens of meters along the margins. It is forced by results from an atmospheric model (Liberato *et al.*, 2013), a regional wave model (Fortunato *et al.*, submitted) and a regional tide and surge model (Fortunato *et al.*, 2016a). Details on the model application and validation are provided in a companion paper (Fortunato *et al.*, 2016b). The water levels were simulated for two different conditions: the same oceanographic and atmospheric forcings of the 2010 event and considering 0.5 m of mean sea level rise (SLR).

The expose elements of the potentially affected areas were analysed using land use/land cover (LULC) data from the Portuguese Land Use Chart of 2007 (COS'07) at the maximum level of disaggregation (level 5).

3. STUDY AREAS

The SOOC is located in the southern margin of the Tagus estuary, in a waterfront within a small bay (Seixal bay) sheltered from the estuary by a 2.3 km long sand spit (Freire *et al.*, 2013) (Fig. 1). The LGVFX is a productive agricultural area that covers about 130 km^2, located in the eastern margin of the estuary (Fig. 1). Separated from the estuary by walls and dykes, the land is below the present mean sea level. Flooding episodes of both oceanic and fluvial origins are frequent.

Both study areas differ significantly in terms of vulnerability components and final composite TV (Table I). The main driver of TV in the LGVFX area is the educational level (FAC7). This rural area presents very low vulnerability in FAC2 (residential areas of families with care-giving responsibilities) and FAC5 (building size). In the urban area, the remaining principal components – FAC1 (old neighbourhoods and population with constraints), FAC3 (residential areas of population with high economic status), FAC4 (population mobility), FAC6 (old urban areas with an aged population) and FAC8 (urban development) – are unevenly classified through the blocks that comprise the SOCC. Mobility (FAC4) is more critical in the block where the fluvial station is located as residents are more dependent on this transport in comparison to the other blocks. In general, the rural context (LGVFX) presents lower vulnerability than the urban context (SOCC).

Table I. Vulnerability classification at the statistical block in the study areas.

Study areas		Principal components (FAC) of TV								TV
		1	2	3	4	5	6	7	8	
LGVFX		L	VL	L	L	VL	M	H	L	VL
SOCC	1	H	M	L	H	L	L	L	L	L
	3	H	M	H	M	VL	M	L	L	M
	4	M	M	M	M	VL	M	H	VH	H

TV (territorial vulnerability) legend: VL-very low; L-low; M-moderate; H-high; VH-very high. SOCC-1, SOCC-2 and SOCC-3 represent the 3 statistical blocks that cover the SOCC area.

4. FLOOD EVENT OF FEBRUARY 2010

4.1. Event characterization

The analysis of the potential oceanographic and atmospheric forcings of the estuarine water levels during the February 27, 2010 event show that a combination of different factors occurred: high spring tide (4.22 m, above chart datum - CD, maximum water level registered in Cascais), storm surge conditions (0.52 m, surge in Cascais based on harmonic synthesis and tidal gauge data at Cascais; 976.2 hPa, minimum atmospheric pressure registered in Lisbon) and very strong local winds (98 km/h, maximum wind intensity from SW in Lisbon). The consequences of this event could have been worse if the storm surge had occurred during the maximum height of the spring tide on March 2 (4.29 m CD, maximum water level registered in

Cascais). As stated before, regarding the estuary, the Tagus river discharge only has impact on the maximum water levels in the upstream sector. The daily average discharge in the Almourol hydrometric station during the studied event (3332.6 m^3/s) is below the 5-year return period value (Management Plan of River Tagus Region).

Due to margins overtopping and flooding the event promoted important physical losses along the estuarine margins. The damages occurred in the waterfront of five municipalities in the Lisbon metropolitan area (Lisboa, Oeiras, Seixal, Alcochete and Vila Franca de Xira, Fig. 1). Considerable damages were registered, namely in the Lisbon Port facilities and public infrastructures such as marginal sidewalks, pavements and public seats. Traffic was interrupted at one of the most touristic places in Lisbon (Ribeira das Naus).

4.2. Local impacts

The Seixal waterfront was one of the most affected areas (Fig. 2), in particular the old city centre. In the SOCC a total of 30 houses were flooded, including private homes and commercial buildings, and the traffic on public roads was interrupted.



Fig. 2. February 2010 flooding event in SOOC: reconstruction of the flood extension (red patch); model results for the 2010 event (light blue) with SLR (dark blue) (image: ESRI Aerial Imagery).

The physical impacts also included extensive damages in basements and road infrastructures, and the societal impacts result mainly from traffic and services disruption. The event mobilized local authorities namely Seixal municipality services and civil protection services, police and the fire-fighters department. Besides the February 27 episode, the SOOC suffered a second flood episode on March 2 associated to the maximum spring water level (see above). Flooding episodes in this area can also occur without overtopping only by the water inflow into the urban drainage system (during extreme high water levels) and its overflow through sinks. In this situation flooding is aggravated by intense precipitation. In the LGVFX the storm surge event promoted damages in the dykes and overtopping in some places leading to agriculture land flooding (Fig. 3). As this event occurred out of the active farm season only up to 5 families and some cattle were evacuated. Other impacts in the upstream area of the estuary included the interruption during one hour of the main railway line and the evacuation of one person from the Mouchão de Alhandra where the rupture of the dyke in the southern area occurred (Fig. 3).

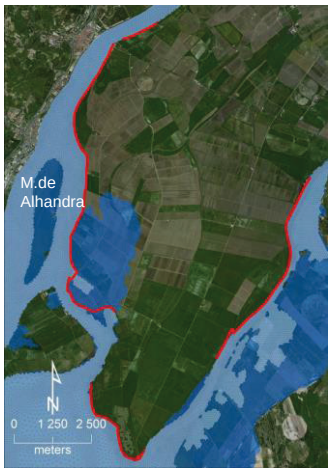


Fig. 3. February 2010 flooding event in LGVFX: reconstruction of the flood affected area (red line); model results for the 2010 event (light blue) with SLR (dark blue) (image: ESRI Aerial Imagery).

5. CHARACTERIZATION OF POTENTIALLY AFFECTED AREAS

The potential affected areas by an event with Xynthia characteristics and SLR will increase in 1.87 hm^2 and 616.03 hm^2 in SOOC and LGVFX, respectively (Fig. 3 and 4, Table II). The largest increase in the latter is due to the low topography, mainly below the present mean sea level.

Table II. LULC classes flooded in the event of 2010 with and without SLR in the study areas.

	Flooded area							
	SOCC				LGVFX			
	Without SLR		With SLR		Without SLR		With SLR	
LULC	hm^2	%	hm^2	%	hm^2	%	hm^2	%
U	1.77	20.4	3.20	30.3	0.00	0.00	0.00	0.00
P	3.62	41.7	3.83	36,3	0,00	0,0	0,00	0,0
I	0.34	3.9	0.34	3.3	0.00	0.0	0.00	0.0
FF	0.00	0.0	0.00	0.0	0.41	0.5	1.68	0.2
RN	0.00	0.0	0.00	0.0	2.33	3.1	5.12	0.7
G	1.29	14.9	1.34	12.7	0.00	0.0	0.00	0.0
IC	0.00	0.0	0.00	0.0	40.10	52.8	638.8	92.3
Sd	0.01	0.1	0.19	1.8	0.00	0.0	0.00	0.0
S	0.64	7.4	0.64	6.1	0.01	0.0	0.01	0.0
BD	0.96	11.1	0.96	9.1	0.00	0.0	0.00	0.0
WL	0.00	0.0	0.00	0.0	18.71	24.7	28.12	4.1
NC	0.00	0.0	0.00	0.0	14.31	18.9	14.46	2.1
AC	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	3.77	0.6
FD	0.04	0.5	0.04	0.4	0.00	0.0	0.00	0.0
Total	8.67	100.0	10.54	100.0	75.87	100.0	691.9	100.0

LULC legend: U - Urban (continuous and predominantly horizontal); P - Parking areas; I - Industry; FF - Farmland facilities; RN - Road network; G - Gardens; IC -Irrigated crops; Sd - Shrub (dense); S – Shrub; BD - Beaches, and dunes; WL – Wetlands; NC - Natural watercourses; AC - Artificial watercourses; FD - Fluvial docks.

The potentially affected areas in the two scenarios (without and with SLR) show significant differences in the expose element typologies (Table II). In the SOCC the most represented typology is parking areas (41.7% in the scenario without SLR and 36.3% with SLR) and urban areas (20.4% of total flooded areas in the scenario without SLR and 30.3% with SLR). Green areas (mostly public gardens) and

beaches and dunes also present significant flooded areas. In the LGVFX the most affected typologies of LULC in the flood event of 2010 were the irrigated crops (52.8% of total affected area). In a scenario of SLR, the 2010 event would affect a significantly greater irrigated area (638.8 hm^2), representing 92.3% of total affected area. Wetlands and natural water courses are LULC types also greatly affected by flooding in both scenarios in the LGVFX.

6. CONCLUSIONS

Storm surge episodes associated with high spring tides can force overtopping and flooding in the Tagus estuary margins, as observed during the Xynthia storm event. During this event important physical losses were registered along the estuarine waterfront, societal impacts resulted mainly from traffic and services disruption, and in a specific case people had to be evacuated. The potential flooding areas considering a similar event and a sea level rise scenario, in two different estuarine contexts (urbanised and agricultural areas), show a relevant increase in the flood extension and contrasts in the exposed elements typology. These results can contribute to the definition of flood risk management strategies as emergency and land-use planning.

Acknowledgements

This work was funded by the Portuguese Foundation for Science and Technology, FCT (MOLINES, PTDC/AAG-MAA/2811/2012) and by the European Union's H2020 programme (BINGO, Grant Agreement: 641739). MR was co-funded by the FCT (SFRH/BPD/87512/2012). The authors thank: Prof. M.L.R. Liberato, project DISASTER, Administração do Porto de Lisboa, Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Direção Geral do Território, Autoridade Nacional de Proteção Civil, Câmara Municipal do Seixal, União das Freguesias de Seixal, Arrentela e Aldeia de Paio Pires and Associação dos Beneficiários da Lezíria Grande de Vila Franca de Xira.

REFERENCES

Aerts, J.C., Lin, N., Botzen, W., Emanuel, K., de Moel, H. (2013). Low-probability flood risk modeling for New York City. *Risk Anal*, 33(5):772-88.

André, C., Monfort, D., Bouzit, M., Vinchon, C. (2013). Contribution of insurance data to cost assessment of coastal flood damage to residential buildings: insights gained from Johanna (2008) and Xynthia (2010) storm events. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 13:2003–2012.

Bertin, X., Li, K., Roland, A., Zhang, Y., Breilh, J.F., Chaumillon, E. (2014). A modeling-based analysis of the flooding associated with Xynthia, central Bay of Biscay. *Coast Eng*, 94:80-89.

Cutter, S.L., Boruff, B., Sherley, W.L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84/2 : 242–261.

Fortunato, A.B., Oliveira, A., and Baptista, A.M. (1999). On the effect of tidal flats on the hydrodynamics of the Tagus estuary. *Oceanol. Acta*, 22(1), 31-44.

Fortunato, A.B., Li, K., Bertin, X., Rodrigues M., and Miguez B.M. (2016a). Determination of extreme sea levels along the Iberian Atlantic coast, *Ocean Eng.*, 111/1: 471-482.

Fortunato, A.B., Freire, P., Bertin, X., Rodrigues, M., Liberato, M.L.R., Ferreira, J. (2016b). Inundação das margens do estuário do Tejo: o caso da tempestade de fevereiro de 1941, 4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica.

Fortunato, A.B., Oliveira, A., Rogeiro, J., Costa, R.T., Gomes, J.L., *et al*. (submitted). Operational forecast framework applied to extreme sea levels at regional and local scales, *J. Operational Oceanography*.

Freitas, J.G. and Dias, J.A. (2013). 1941 windstorm effects on the Portuguese Coast. What lessons for the future? *J. Coastal Res.*, Special Issue 65, 714-719.

Guerreiro, M., Fortunato, A.B., Freire, P., Rilo, A., Taborda R., *et al*. (2015). Evolution of the hydrodynamics of the Tagus estuary (Portugal) in the 21st century. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15/1: 65-80.

Bilskie, M., Hagen, S., Medeiros, S.C., Passeri, D. (2014). Dynamics of sea level rise and coastal flooding on a changing landscape. *Geoph. Res. Letters*, 41(3):927–934.

Liberato M.L.R., Pinto J.G., Trigo R.M., Ludwig P., Ordõnez P., Yuen D., Trigo I.F. (2013). Explosive development of winter storm Xynthia over the subtropical North Atlantic Ocean. *Nat. Haz. and Earth System Sc*., 13, 2239–2251.

Rilo, A.R., Freire, P., Santos, P.P., Tavares, A.O., Sá, L. (2015). Historical flood events in the Tagus estuary: contribution to risk assessment and management tools. In: Pedofillini *et al.* (eds) Safety and Reliability of Complex Engineered Systems, ESREL 2015. CRC Press: 4281-4286.

Tavares, A.O., Santos, P.P., Freire, P., Fortunato, A.B., Rilo A., *et al*. (2015). Flooding hazard in the Tagus estuarine area: the challenge of scale in vulnerability assessments. *Envir. Science & Policy*, 51: 238-255.

Vargas, C., Oliveira, F.S.B.F., Oliveira, A., & Charneca, N. (2008). Flood vulnerability analysis of an estuarine beach: application to Alfeite sand spit (Tagus Estuary). *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 8(1), 25-43.

Shoreline evolution modelling on platform beaches

R. Taborda (1) and M. Ribeiro (2)

(1) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 1749-016, Lisboa. rtaborda@fc.ul.pt

(2) Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa / Instituto Hidrográfico.

Abstract: Shoreline evolution models are useful tools in analyzing and predicting coastal morphological evolution on seasonal to decadal time scales. Several analytic and numerical models have been proposed to describe changes in shoreline based on analysis of the balance of sediment volumes over a certain time period, assuming an equilibrium beach profile. In platform beaches, due to sediment scarcity, the equilibrium profile assumption is no longer valid so the longshore drift estimates must consider the presence of a rocky shore platform and limited sand availability. This work describes a shoreline evolution model (SEM-PLAT), which was developed to simulate shoreline changes on coastal stretches where continuous or pocket beaches develop over a rocky platform. The model aims to predict beach development and evolution on headland-bay coasts and targets the understanding of some key processes such as beach rotation and sediment headland bypassing.

Key words: Beach, bypassing, modelling, headland.

1. INTRODUCTION

Shoreline evolution both due to natural and human-induced causes frequently conflicts with the man-made activities and infrastructures. Assessing and understanding the processes that drives coastal evolution is therefore essential to support sound based implementation of integrated coastal zone management strategies. At present, shoreline evolution models, based on the conservation of sand volume equation (one-line models), has remained the preferred method for assessing shoreline evolution that arises from anthropogenic or natural changes (Thomas and Ashley, 2013).

Several analytic and numerical models have been proposed to describe changes in shoreline based on analysis of the balance of sediment volumes over a certain time period (Pelnard-Considère, 1956; Hanson, 1989; Dabees and Kamphuis, 1998; Steetzel *et al*., 2000; Coelho *et al*., 2004; Frey *et al*., 2012). These models are based on the assumption that the beach profile shape remains constant; the shoreward and seaward vertical limits of the profile are constant and there is an adequate sand supply (i.e., an infinite supply of sand is assumed) (Thomas and Ashley, 2013). In platform beaches, due to sediment scarcity, the equilibrium profile assumption is no longer valid so longshore drift estimates and beach profile development must consider the presence of a rocky shore platform and limited sand availability.

The objective of this work is to describe a new shoreline evolution model (SEM-PLAT), which was developed to simulate shoreline changes on coastal stretches where beaches (continuous or pocket) develop over a rocky platform.

2. MODEL DESCRIPTION

SEM-PLAT is a one-line numerical model for modelling shoreline evolution on platform beaches as the result of wave-driven longshore sediment transport. The model is based on the standard conservation of sand volume equation that governs most shoreline change models:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \qquad [1]$$

where x is distance alongshore, t is time, Q is the longshore drift and V is the volume of the active profile. This equation shows that profile change rate ($\partial V/\partial t$) is directly related to the alongshore gradients in longshore drift ($\partial Q/\partial x$).

In finite difference form, the conservation of sand mass for each coastal section can be expressed as:

$$\Delta V = (Q_{in} - Q_{out})\Delta t/\Delta x \qquad [2]$$

where Q_{in} is the sand that enters the coastal section and Q_{out} is the volume leaving the cell (Fig. 1).

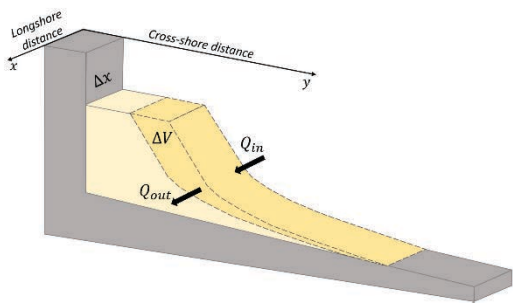


Fig. 1. Definition of standard conservation of sand volume for shoreline change calculation in a control section.

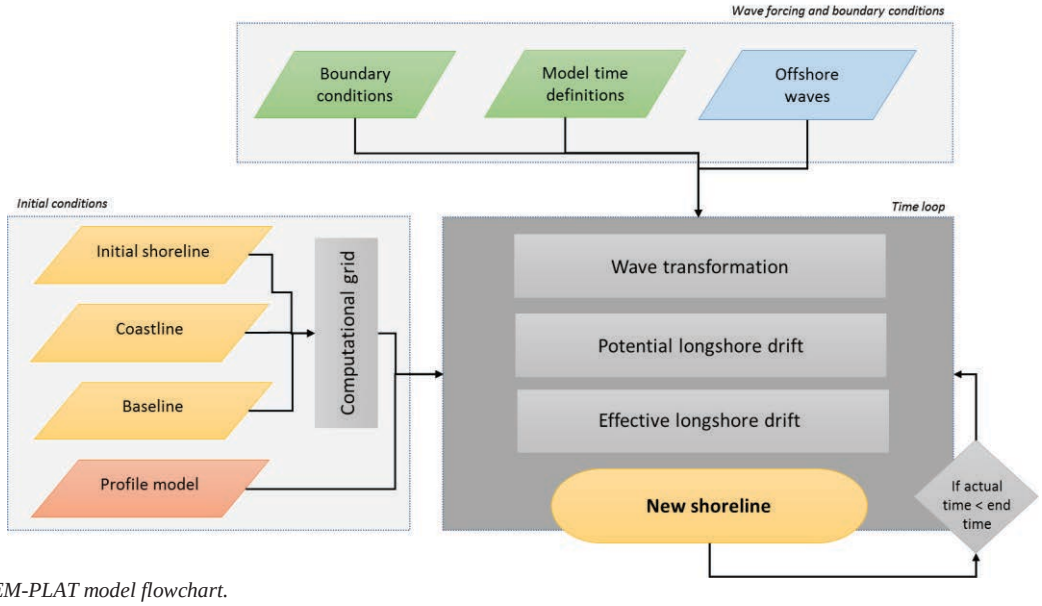


Fig. 2. SEM-PLAT model flowchart.

Equation 2 can be solved numerically, using finite difference methods over a discretized coastline domain knowing the longshore drift and boundary conditions. Model flowchart is depicted in Fig. 2.

2.1. Computational grid

The computational grid is built from an initial shoreline, a coastline and a baseline (Fig. 3): the shoreline (x_s, y_s) corresponds to the beach berm crest and the coastline (x_c, y_c) the cliff foot. The baseline (x_b, y_b) is a reference line (s grid) that represents the trend of the shoreline (Roelvink and Reniers, 2012).

The grid consists of n cells defined by $n+1$ cell boundaries, with uniform or variable alongshore resolution. SEM-PLAT is based on a staggered grid where the shoreline positions (n_i) are defined at the center of the grid cells and the longshore drift (Q_i) and the azimuth of the normal to the shoreline (φ_c) at the cell boundaries. The left boundary is located at grid cell 1, and the right boundary is at cell n.

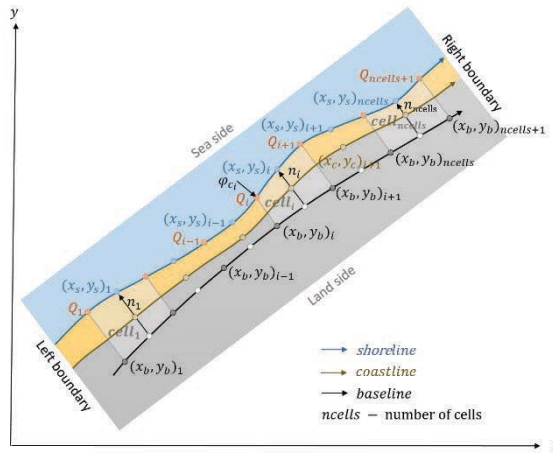


Fig. 3. Finite difference staggered grid.

2.2. Profile model

SEM-PLAT profile model assumes a two dimensional profile cut in a hard rock substrate over which a sandy beach develops. The model is similar to the one proposed by Taborda and Ribeiro, (2015) where the beach overlays a flat, gently-sloping, shore platform. In this case this idealized beach comprises a berm and a face, which extends from the berm crest to the rocky platform (Fig. 4). Beach profile is segmented in three domains: (1) a berm, (2) a beachface, and (3) a nearshore zone. The berm and beachface have constant slopes and the nearshore zone is based on the Dean's equilibrium profile, considering that at the origin of the Dean's profile, the slope is equal to the beachface slope. The model assumes that shore platform have a constant slope.

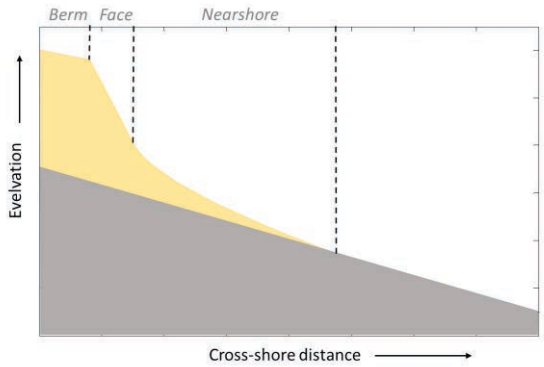


Fig. 4. Schematic representation of the beach profile (yellow) and rocky platform (gray).

2.3. Boundary conditions

SEM-PLAT allows two options for the boundary conditions: closed and open. If an open boundary condition is chosen, sediment is transported freely across the boundary (default boundary condition). When a closed boundary condition is specified,

means no sediment is transported across the boundary.

2.4. Wave transformation

Wave transformation is based on the wave linear theory. Wave propagation from offshore to the closure depth is computed considering a regional bathymetry, with uniform orientation that does not change in time. From the closure depth to the breaking depth the transformation is performed considering (time varying) normal direction to the shoreline between adjacent cells (Fig. 3). The propagation in this domain follows the explicit approach present in Larson *et al.* (2010) targeting to optimize the computation time.

2.5. Potential longshore drift

The longshore sediment transport induced by the waves is computed using the CERC formula:

$$Q = K\left(\frac{\rho\sqrt{g}}{16\gamma_b^{\frac{1}{2}}(\rho_s-\rho)(1-p)}\right)Hs_b^{\frac{5}{2}}\sin(2\theta_b) \qquad [3]$$

where γ_b is the wave breaking criteria (0.78); ρ is the sea water density (1025 kg.m^{-3}); ρ_s is the quartz density (2650 kgm^{-3}); g is the gravitational acceleration (9.81 ms^{-2}); p is the sand porosity (0.4); Hs_b is the wave significant height at breaking; θ_b is the wave breaker angle, and K is an empirical coefficient equal to 0.39, according to CERC (1984).

2.6. Effective longshore drift

In rocky coasts the effective longshore drift is generally much lower than potential transport, as the magnitude of sedimentary distribution processes (potential longshore drift) is general much larger than the sedimentary supply. The consideration of a sand starving coast is a cornerstone of the SEM-PLAT model development. SEM-PLAT first computes longshore sand transport rates along the coastal stretch assuming that there is no sand deficit (potential longshore drift). Then, considering sand availability, which depends not only on the sediment at the cell but also on the updrift ones, it estimates effective longshore transport. To identify updrift cells, SEM-PLAT computes a sediment accumulation vector which is a cumulative count of the number of cells that naturally drains into each cell (analogous to the flow accumulation tool used in hydrology). After this, the model, sweeps the cells, from updrift to downdrift adjusting the longshore transport magnitude to the available sand. Finally, the sand retained in each cell is redistributed within the beach profile.

3. MODEL APLLICATION

SEM-PLAT first time application is presented for the coastal stretch adjacent between Maçãs and Adraga beaches, as a validation of seasonal and bypassing processes. This coastal stretch that extends for about 3 km, is located at Sintra municipality (Portugal), and is exposed to the high energetic swell generated in the North Atlantic. It corresponds to a cliffed rocky coast that accommodates a series of headland-bay beaches (Maçãs, Pequena, Grande and Adraga) (Fig. 5).

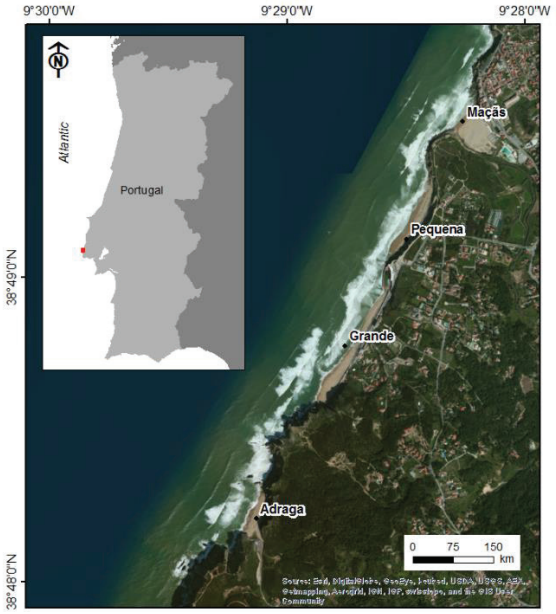


Fig. 5. Study site.

3.1. Model setting

The computational domain extended from north of Maçãs beach to the Adraga beach and was discretized in 30 cells with 100 m length. The coastline was defined as the base of the cliff for most of the domain except at Maçãs, where it was defined as the dune foot. The initial shoreline, corresponded to a hypothetical scenario where all the coast was fulfilled with sand with a continuous beach extending for the entire domain (Fig. 6A). The simulated domain only considered the upper section of the beach, from -1 m (MSL) to the beach berm at 4 m (MSL). Beachface slope was considered equal to 0.8. The northern boundary was defined closed and the southern open.

Simulations were conducted during 3 months under constant wave forcing representative of time-averaged summer (Jul/Aug/Sep) conditions: H_s = 1.4 m; T_p = 8.8 s and Dir = 314º.

3.2. Model results

Fig. 6B shows model results. After the simulation period it can be seen that the sand was redistributed within the coastal stretch, with a pattern that closely matches the coastal configuration displayed by the Landsat image of 23/08/2013 (Fig. 6C). The model was able to reproduce: 1) the wide extent of Maçãs beach, with a well-developed berm; 2) the existence of the Pequena beach that comprises only a narrow beach face; and 3) the shape of Grande beach, with a berm that is wider at the southern section.

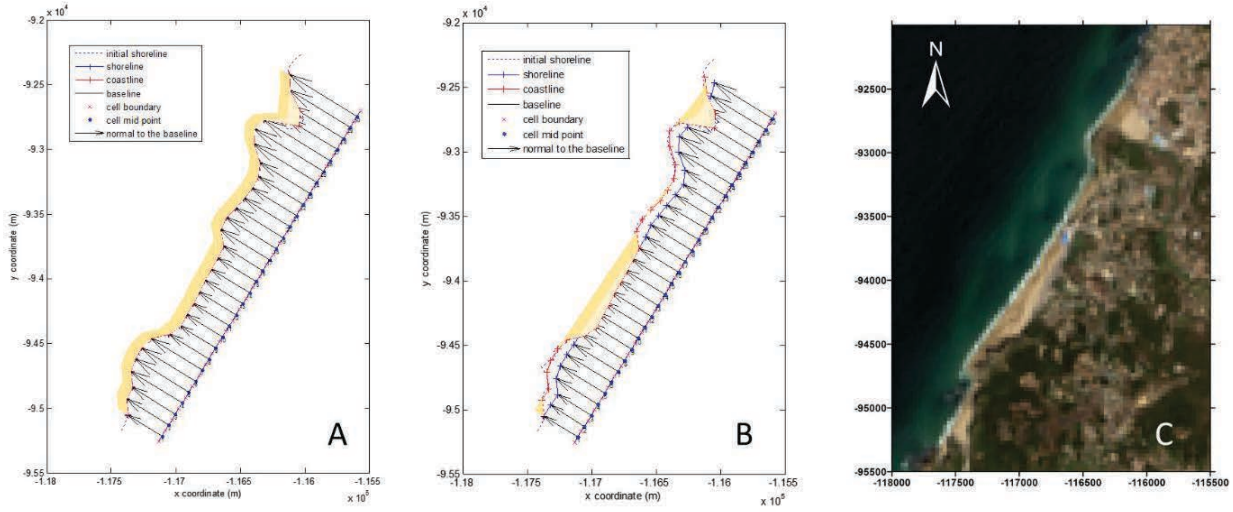


Fig. 6. A) Initial conditions; B) Results after 3-month simulation with constant wave forcing typical of summer conditions (H_s= 1.4 m; T_p = 8.8 s and Dir = 314º; light yellow tone: beach berm; darker yellow tone: beach face; the onshore beach limit is represented by the coastline position; when the shoreline position is shoreward of the coastline means that there is no beach berm). C) Landsat image of 23/08/2013.

4. CONCLUSIONS

This work describes the SEM-PLAT model, a new tool to simulate shoreline evolution on platform beaches. Model first results are quite encouraging and suggest that it can be a useful tool to understand some key processes at rocky coasts such as those associated with beach development and sediment headland bypassing.

Acknowledgements

Mónica Ribeiro is supported by a PhD grant of Fundação para a Ciência e Tecnologia (SFRH/BD/79126/2011). The work is a contribution of Instituto Dom Luiz – IDL (UID/GEO/50019/2013).

REFERENCES

CERC (1984). Shore Protection Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Coelho, C., Taveira-Pinto, F. and Veloso-Gomes, F. (2004). Coastal evolution and coastal works in the southern part of Aveiro lagoon inlet, Portugal. *Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering*, Lisboa, Portugal, 4, pp. 3914–3926.

Dabees, M. and Kamphuis, W. (1998). Oneline, a numerical model for shoreline change. *Proceedings of the International Conference in Coastal Engineering*, Copenhagen, Denmark, pp. 2668–2681.

Frey, A., K. Connell, H. Hanson, M. Larson, R. Thomas, S. Munger and A. Zundel. (2012). GenCade version 1 model theory and user's guide. ERDC/CHL TR-12-25. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.

Hanson, H. (1989). Genesis - A Generalized Shoreline Change Numerical Model. *Journal of Coastal Research*, 5(1):1-27.

Larson, M., Hoan, L. and Hanson, H. (2010). Direct Formula to Compute Wave Height and Angle at Incipient Breaking. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 136(2):119-122.

Pelnard-Considére, R. (1956). Essai de theorie de l'evolution des forms de rivages en plage de sable et de galets. Quatrieme journees de l'hydraulique, les energies de la mer, question III. 289–298 (Rapport n. 1).

Roelvink, J.A. and Reniers, A. (2012). *A guide to modeling coastal morphology*. Advances in Coastal and Ocean Engineering, vol. 12. World Scientific, Singapore, 274 p.

Steetzel, H.J., de Vroeg, H., van Rijn, L.C. and Stam, J.M. (2000). Long-term modelling of the Holland coast using a multi-layer model. *Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering*. ASCE, Sydney, Australia, pp. 2942–2955.

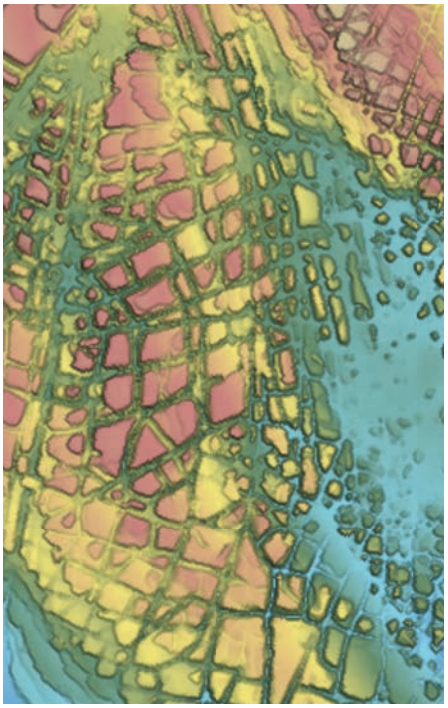
Taborda, R. and Ribeiro, M.A. (2015). A simple model to estimate the impact of sea-level rise on platform beaches. *Geomorphology*, 234: 204-210.

Thomas, R., and Ashley E. (2013). Shoreline change modeling using one-line models: General model comparison and literature review. Vicksburg, MS. doi:ERDC/CHL CHETN-II-55.

OCEANOGRAFIA QUÍMICA

4as JORNADAS DE ENGENHARIA HIDROGRÁFICA

21, 22 E 23 DE JUNHO DE 2016



Metais vestigiais (Cu, Zn e Pb) em sedimentos intermareais do estuário inferior do Sado – Estabelecimento de valores de fundo geoquímico e avaliação da ocorrência de contaminação

S. Moreira (1, 2), M. C. Freitas (2, 3) e M. F. Araújo (4)

(1) Instituto Hidrográfico; R. das Trinas nº 49, 1249-093 Lisboa; sandra.moreira@hidrografico.pt

(2) Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.

(3) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.

(4) Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares, Departamento de Engenharia e Ciências Nucleares, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Campus Tecnológico e Nuclear.

Resumo: Os sapais estuarinos são ecossistemas naturais reconhecidos pela capacidade de retenção de metais capazes de gerar efeitos adversos no meio ambiente, motivo pelo qual nas últimas décadas tem ocorrido um crescente interesse na quantificação da contaminação por elementos vestigiais nestes sistemas. Através da análise sedimentológica e geoquímica de sondagens curtas do alto sapal do Faralhão, da Carrasqueira e da Malha da Costa no estuário do Sado foram definidos os perfis de distribuição vertical da textura e de um conjunto de elementos ao longo de cada coluna sedimentar. A identificação de tendências temporais do comportamento do Cu, Zn e Pb nos sedimentos vasosos permitiu o estabelecimento de valores de fundo para o estuário inferior do Sado e consequentemente a identificação de contaminação nestes metais em sedimentos atuais do raso de maré e baixo e alto sapal das áreas intermareais em estudo, com algumas exceções no Sapal da Malha da Costa.

Palavras-chave: raso de maré, sapal, fundo geoquímico, fatores de enriquecimento.

1. INTRODUÇÃO

Os estuários são ambientes de transição que frequentemente funcionam como sumidouros de sedimento e consequentemente dos contaminantes presentes em resultado de atividades antropogénicas na bacia hidrográfica ou ao longo das margens (Ridgway e Shimmield, 2002). Deste modo, as concentrações de metais vestigiais nos sedimentos estuarinos podem refletir um processo de contaminação recente ou histórica decorrente da ocupação e desenvolvimento da área de drenagem. O estudo de colunas sedimentares datadas é fundamental na diferenciação entre as concentrações pristinas (valor de fundo geoquímico) e o contributo antropogénico (contaminação) de metais vestigiais em sedimentos estuarinos.

O estuário do Sado destaca-se, a nível nacional, devido à sua área (170 km^2), à existência da restinga de Tróia que protege a zona interna do estuário da ação direta das ondas oceânicas, e do desenvolvimento, na margem direita, da cidade de Setúbal à qual está associada um dos principais portos portugueses e uma importante zona industrial. Um dos problemas de cariz ambiental com que este sistema estuarino se depara é a contaminação por metais vestigiais devido à ocorrência: (1) de coutos mineiros na sua bacia hidrográfica (em atividade e inativos), cuja exploração à escala industrial das massas de sulfuretos maciços se iniciou no séc. XIX (até à década de 70 do séc. XX, essencialmente para produção de ácido sulfúrico) (Gaspar, 1998), e (2) do Complexo Industrial da Mitrena, onde estão implantadas dezenas de empresas industriais de dimensão variável (Caramelo *et al*., 2011).

O presente estudo visou o estabelecimento de valores de fundo geoquímico em cobre (Cu), zinco (Zn) e chumbo (Pb) para o estuário inferior do Sado, com recurso ao estudo sedimentológico e geoquímico de três sondagens curtas (< 1 m), de modo a averiguar a ocorrência de contaminação nos sedimentos recentes das principais áreas intermareais – Sapal do Faralhão, na margem direita, e Sapais da Carrasqueira e da Malha da Costa, na margem esquerda do estuário do Sado.

2. MÉTODOS

Para o estabelecimento dos valores de fundo geoquímico recorreu-se ao estudo de colunas sedimentares curtas representativas da sedimentação secular (mesoescala temporal) no Sapal do Faralhão (FAR4, 76 cm), da Carrasqueira (CAR2, 120 cm) e da Malha da Costa (MC3, 78 cm) (Figura1), obtidas com recurso a um amostrador Van der Horst. Cada coluna sedimentar foi seccionada, e amostras de 1 a 2 cm de espessura foram submetidas a análise elementar por Espectrometria de Absorção Atómica de Chama (Al, Cu, Pb e Zn) e por Análise Gravimétrica (Si) no Laboratório de Análises Químicas do Departamento de Geologia da FCUL. Em cada coluna sedimentar foram estimadas taxas

de sedimentação, com base na concentração de ^{137}Cs, determinada na Université Bordeaux I.

Os sedimentos superficiais (~4 cm) para avaliação de ocorrência de contaminação (estudo à microescala temporal) foram amostrados no Outono de 2005 e na Primavera de 2006, ao longo de um perfil estabelecido desde o raso de maré até ao alto sapal, em cada uma das três áreas intermareais e designados de FAR-S, CAR-S e TRO-S (Figura 1), respetivamente. A análise geoquímica elementar de um total de 54 amostras foi efetuada por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X Dispersiva de Energias no ex-Instituto Tecnológico e Nuclear (atual Campus Tecnológico e Nuclear do IST). A precisão e exatidão do método analítico encontra-se em Moreira *et al*. (2009).

Complementarmente, todas as amostras foram analisadas do ponto de vista textural (separação da fração > e <63 μm através de peneiração por via húmida) e do teor em matéria orgânica (diferença ponderal por queima na mufla de 2 g de sedimento, durante 2 h a 500°C) no Laboratório de Processos Costeiros do Departamento de Geologia da FCUL.

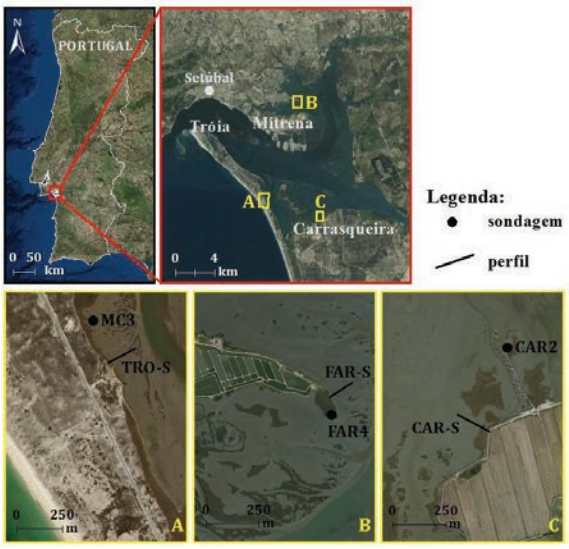


Fig. 1. Localização do Estuário do Sado, da amostragem à meso- e microescala temporal nas áreas intermareais da Malha da Costa (A), Faralhão (B) e da Carrasqueira (C).

3. CARACTERIZAÇÃO DOS SEDIMENTOS INTERMAREAIS - SEDIMENTOLOGIA E GEOQUÍMICA

Cada coluna sedimentar corresponde, de acordo com a classificação de Flemming (2000), à acumulação de vasas e vasas ligeiramente arenosas, numa acumulação monótona. As partículas de dimensão >63 μm não excedem os 15% e são essencialmente fibras vegetais, observando-se uma diminuição da fração <63 μm à medida que ocorre um aumento do teor em matéria orgânica em direção à superfície (Figura 2). É na camada superficial (~20 cm) que ocorrem os teores em matéria orgânica mais elevados, alcançando-se máximos de 21,5, 24 e 22 % em FAR4, CAR2 e MC3, respetivamente; tal situação resulta da presença da biomassa subterrânea da vegetação colonizadora do alto sapal (e.g. *Sacocornia fruticosa* e *Halimione portulacoides*).

A homogeneidade textural destas colunas sedimentares também é refletida nos teores em Si e Al e respetivo padrão de variação temporal. Ambos os elementos variam numa estreita faixa de concentrações (Figura 2), característica de sedimentos constituídos predominantemente por aluminossilicatos, exibindo o mesmo padrão de variação ao longo do tempo. A diminuição do teor destes elementos em direção à superfície advém do efeito de diluição promovido pela presença de matéria orgânica na camada superficial.

No que respeita à variação dos teores em Cu, Zn e Pb (Figura 2), verifica-se que: 1) o Cu surge com teores mais elevados e num intervalo de concentrações mais amplo em FAR4, e seguidamente em CAR2 e MC3; 2) é em CAR2 que o Zn apresenta um intervalo de concentrações mais amplo e onde são alcançados os teores mais elevados deste elemento, enquanto nas outras duas colunas sedimentares ocorre com teores relativamente semelhantes; e 3) em FAR4 o teor máximo em Pb (171 mg kg^{-1}) é 5 e 2,5 vezes superior ao determinado em CAR2 e MC3, respetivamente.

As taxas de sedimentação médias, extrapoladas para toda a coluna sedimentar, indicam que a base de FAR4 e MC3 (0,40 e 0,38 cm ano^{-1}, respetivamente) corresponde à passagem entre os séculos XVIII e XIX, e que CAR2 (0,34 cm ano^{-1}) corresponde à deposição de sedimento desde 1650 DC (século XVII) (ver Ferreira, 2007 e Freitas *et al*., 2008).

A variabilidade textural dos sedimentos superficiais das principais áreas intermareais do estuário inferior do Sado encontra-se expressa na Figura 3. Os sedimentos que compõem FAR-S e CAR-S são maioritariamente vasas e vasas ligeiramente vasosas, com teor em matéria orgânica variável, entre 6 e 33 %. Enquanto os sedimentos vasosos exibem teores em Al e Si entre 6,0 e 7,8% e 20,7 e 24,1%, respetivamente, as 4 amostras arenosas exibem ~3 – 5% de Al e desde 30 a 36,5% de Si (Tabela I). Ao longo de TRO-S ocorrem essencialmente areias a areias vasosas, com teores em matéria orgânica variáveis que geralmente não excedem 12 %. Os sedimentos do Sapal da Malha da Costa exibem intervalos de concentração em Al e Si de 1,2 a 6,3% e de 27,3 a 45,0%, respetivamente (Tabela I). Em termos de metais vestigiais (Cu, Zn e Pb), os teores obtidos são claramente influenciados pela textura do sedimento, sendo os de carácter vasoso que tendem a exibir concentrações mais elevadas (Tabela I).

4. ESTABELECIMENTO DE VALORES DE FUNDO GEOQUÍMICO

As colunas sedimentares recolhidas no estuário inferior do Sado representam a acumulação de sedimentos anteriores à década de 60 do século XIX, quando se iniciou a exploração mineira industrial (Quevauviller *et al.*, 1989). Uma vez que existe o conhecimento da exploração significativa de chapéus de ferro no período romano (e.g. Aljustrel e Caveira) (Gaspar, 1998), possivelmente os valores de fundo geoquímicos obtidos não corresponderão a valores pristinos para este sistema estuarino, mas sim a valores pré-industriais. Este valor de fundo geoquímico pré-industrial foi estabelecido com recurso ao método direto (ou geoquímico) que consiste na distinção, em cada coluna sedimentar, entre as concentrações de um dado metal vestigial "sem influência humana", que geralmente surgem nas amostras dos níveis mais profundos e menos impactados de uma coluna sedimentar, e as concentrações anómalas que surgem em resultado de contributos antropogénicos.

Para um determinado metal vestigial o valor de fundo geoquímico local corresponde ao intervalo (ou mediana) das concentrações mais baixas (Horckmans *et al.*, 2005). Devido ao facto de o intervalo de concentrações que define o valor de fundo geoquímico pré-industrial de Cu, Zn e Pb ser similar em todas as colunas sedimentares em estudo, procedeu-se ao agrupamento das três populações de dados. Este novo conjunto de dados foi submetido à remoção iterativa dos valores anómalos (*outliers*), i.e. que não se inserem no intervalo definido pela média ± 2 × desvio padrão. Assim sendo, no estuário inferior do Sado, os teores que definem o valor de fundo geoquímico pré-industrial em Cu, Zn e Pb são 37 – 46, 67 – 154 e 15 – 43 mg kg^{-1}, respetivamente.

5. AVALIAÇÃO DO GRAU DE CONTAMINAÇÃO DE SEDIMENTOS INTERMAREAIS

Considerando que se está perante uma situação de contaminação quando um determinado elemento surge no sedimento em teor superior ao estabelecido como valor de fundo geoquímico (Chapman, 2007), recorreu-se à avaliação da contaminação dos sedimentos de FAR-S, CAR-S e TRO-S através da determinação de Fatores de Enriquecimento (F.E.), usando o Al como elemento normalizador, através da seguinte expressão:

$$F.E. = \left(\left[\frac{metal}{Al} \right]_{amostra} \Big/ \left[\frac{metal}{Al} \right]_{valor\ de\ fundo\ geoqu\acute{i}mico} \right)$$

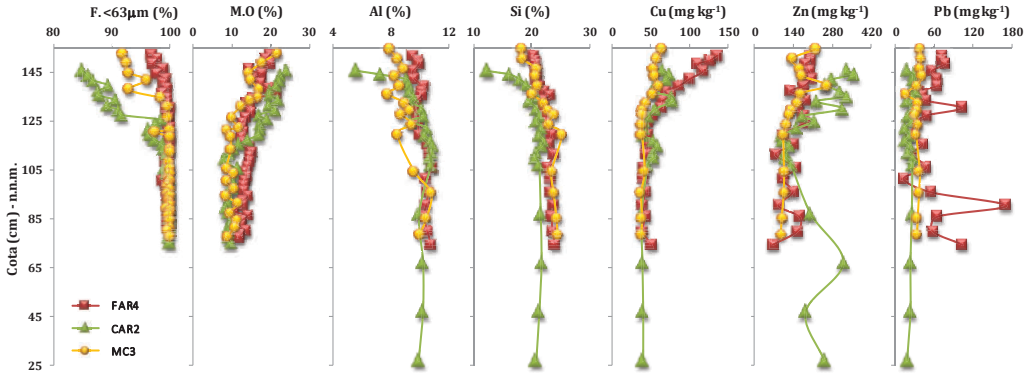


Fig. 2. Distribuição vertical de parâmetros sedimentológicos e geoquímicos ao longo de colunas sedimentares que caraterizam as principais áreas intermareais do estuário inferior do Sado.

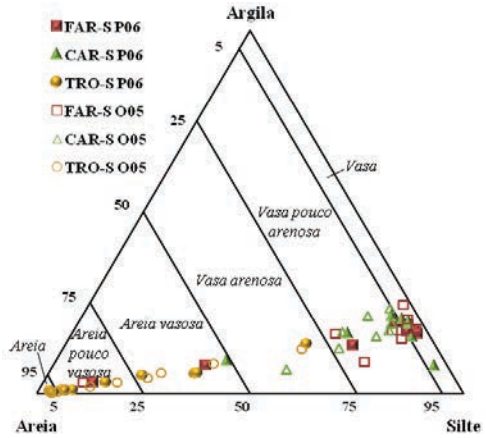


Fig. 3. Classificação textural dos sedimentos intermareais superficiais do estuário inferior do Sado em função do rácio areia/vasa (Flemming, 2000).

Tabela. I. Intervalo de concentração de elementos maiores (%; Si e Al) e vestigiais (mg kg^{-1}; Cu, Zn e Pb) nos sedimentos superficiais intermareais do estuário inferior do Sado.

Perfil	Campanha de amostragem	Al	Si	Cu	Zn	Pb
FAR-S	Outono 2005	2,8-7,8	25,6-34,3	38-102	105-364	45-132
	Primavera 2006	3,1-7,6	23,3-30,3	37-88	114-269	57-134
CAR-S	Outono 2005	6,0-7,8	21,2-25,4	50-86	138-417	35-77
	Primavera 2006	3,5-7,6	20,7-36,3	29-83	67-331	28-74
TRO-S	Outono 2005	1,2-6,3	27,3-45,0	30-76	11-68	13-69
	Primavera 2006	1,2-6,7	24,6-44,9	31-110	12-57	13-197

A mediana dos teores Al-normalizados de Cu, Zn e Pb que caracteriza os valores de fundo geoquímico (i.e. pré-industriais) no estuário inferior do Sado, é de 4,03, 10,22 e 2,67, respetivamente.

De acordo com Zhang & Liu (2002), F.E. superiores a 1,5 indicam que uma proporção do metal provém

de fonte(s) de contaminação. Assim sendo, os sedimentos superficiais intermareais do estuário inferior do Sado exibem, de um modo geral e independentemente da campanha de amostragem, F.E. em Cu, Zn e Pb indicativos de contaminação, com exceção de 5 amostras em TRO-S (FE = 1,0 – 1,4) (Figura 4), indicando teores similares aos que caracterizam o período pré-industrial. Enquanto os $F.E._{máx}$ de Cu e Zn não excedem os 6,2, o Pb exibe F.E. que podem alcançar valores até 17,9.

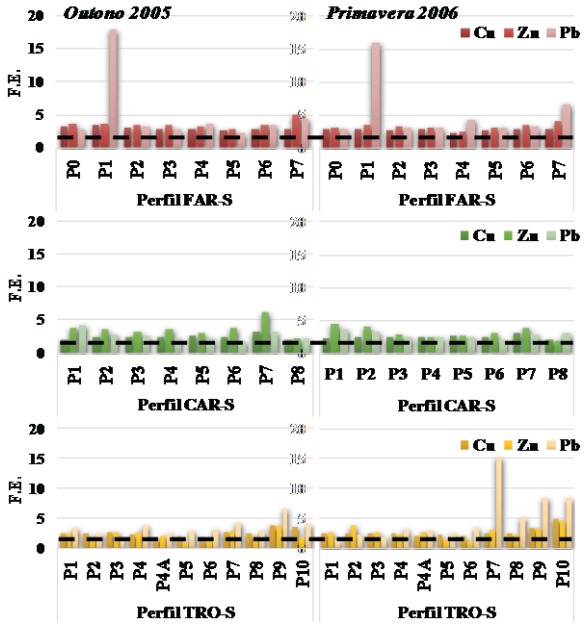


Fig. 4. Fatores de Enriquecimento (F.E.) em (Cu), zinco (Zn) e chumbo (Pb) dos sedimentos superficiais das principais áreas intermareais do estuário inferior do Sado.

A camada superficial (profundidade máxima de 29 cm) de cada coluna sedimentar analisada também exibe enriquecimento nos três metais, com exceção de CAR2 relativamente ao Pb, o qual pode ocorrer por influência da vegetação halófita. O início da contaminação dos sedimentos por Cu, Zn e Pb não foi síncrono ao longo das áreas intermareais do estuário inferior. Com a instalação de indústrias na península da Mitrena, desde o final da década de 20 do séc. XX, observa-se no decorrer da década seguinte o início da contaminação em Zn ($FE_{máx}$ = 2,1 – 5,7). Em termos de contaminação em Cu, esta só ocorre em sedimentos de FAR4 e MC3 ($FE_{máx}$ = 3,6 e 2,0, respetivamente) depositados após o início da década de 50; em CAR2 somente os sedimentos depositados a partir da década de 60 se encontram contaminados ($FE_{máx}$ = 2,9). A contaminação dos sedimentos em Pb, que se deve essencialmente ao tráfego automóvel, ocorre em FAR4 desde o final da década 30 do séc. XX ($FE_{máx}$ = 4,0), posteriormente ao desenvolvimento industrial, e infraestruturas associadas, na margem norte do estuário, e em MC3 posteriormente à década de 70 ($FE_{máx}$ = 1,8), coincidindo com a construção da estrada Tróia – Comporta em 1968.

Agradecimentos

S. Moreira beneficiou de uma Bolsa de Doutoramento (SFRH/BD/31351/2006) da FCT. Este trabalho foi parcialmente suportado pelo projeto MicroDyn (POCTI/CTA/45185/2002) com financiamento da FCT, e apoiado pelo IDL – programa UID/GEO/50019/2013-FCT.

REFERÊNCIAS

Caramelo, A.R., Cornaglia, G., Bucho, J.L.; Macedo, M., Santos, I.A., Pires, P. e Sacadura, S. (2011). Carta de risco da Península da Mitrena. A.N.P.C.L, S.M.P.C. e Bomb. Setúbal, 94pp.

Chapman, P.M. (2007). Determining when contamination is pollution – Weight of evidence det. for sed. and eff. *Env. Int.*, 33(4), 492-501.

Flemming, B.W. (2000). A revised textural clas. of gravel-free muddy sediments on the basis ternary diagrams. *Cont. Shelf Res.*, 20, 1125-1137.

Ferreira, R.M.C. (2007). *Caracterização geoambiental do Sítio da Carrasqueira (Estuário do Sado)*. Tese de Mestrado, FCUL, 276pp.

Freitas, M.C., Andrade, C., Cruces, A., Munhá, J., Sousa, M.J., Moreira, S., Jouanneaus, J., e Martins, L. (2008). Anth. inf. in the Sado est. (Port.): a geo. app. *J. Ib. Geol.*, 34(2), 271–286.

Gaspar, O.C. (1998). História da mineração dos depósitos de sulf.s maciços vulcanogénicos da F. Pir. Portuguesa. *Bol. Minas*, 35(4), 401-414.

Horckmans, L., Swennen, R., Deckers, J., e Maquil, R. (2005). Local backg. conc. of trace elem. in soils: a case study in the G. D. of Luxemburg. *Catena*, 59, 279-304.

Moreira, S., Freitas, M.C., Araújo, M.F., Andrade, C., Munhá, J., Fatela, F., e Cruces, A. (2009). Cont. of intertidal sediments - the case of Sado estuary (Portugal). *J.C.R.*, SI 56(II), 1380-1384.

Quevauviller, P., Lavigne, R., e Cortez, L. (1989). Imp. of ind. and mine drainage wastes on the h. metal distrib. in the drain. basin and est. of the Sado River (Portugal). *Env. Pol.*, 59(4), 267–86.

Ridgway, J., e Shimmield, G. (2002). Estuaries as repositories of hist.. contam. and their impact on shelf seas. *Est., C. and Sh. Sc.*, 55(6), 903-928.

Zhang, J., e Liu, C.L. (2002). River. comp. and est. geoch. of partic. metals in China — Weath. features, anth.. imp. and chem. fluxes. *Est., C. and Sh. Sc.*, 54(6), 1051–1070.

Metodologias para a Identificação de Fontes de Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

A.C. Rocha (1), P. Santos (1) e C. Palma (1)

(1) Instituto Hidrográfico; R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa; catarina.rocha@hidrografico.pt

Resumo: Os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) são compostos orgânicos que, dadas as suas propriedades, tendem a ficar adsorvidos à matéria orgânica particulada e tecidos, induzindo nos seres vivos efeitos tóxicos ou carcinogénicos e mutagénicos. A sua monitorização e identificação de fontes torna-se assim relevante especialmente nos sedimentos pois são o seu principal reservatório e fonte secundária de contaminação dos sistemas aquáticos. A identificação de fontes de PAHs é desafiadora, principalmente nas imediações de centros urbanos onde existem múltiplos pontos de emissão. Nestes casos recorre-se a vários métodos de tratamento de dados que se complementam: reconhecimento de padrões de distribuição de PAHs, análise espaço-temporal, razões de diagnóstico e métodos multivariados (e.g. análise de componentes principais). Para demonstrar a sua aplicabilidade, estes métodos foram utilizados em teores de PAHs determinados em sedimentos de alguns sistemas marinhos portugueses possibilitando identificar as suas principais origens.

Palavras-chave: Sedimentos, PAHs, razões de diagnóstico, análise de componentes principais.

1. INTRODUÇÃO

Os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) são compostos constituídos por dois ou mais anéis benzénicos condensados. Dada a sua persistência e lipofilícidade são facilmente adsorvidos à matéria orgânica e tecidos, persistindo por longos períodos temporais. A sua toxicidade e potencial carcinogénico e mutagénico levaram a que 16 fossem considerados como substâncias prioritárias pela *United States Environmental Protection Agency* (US EPA). Face aos sedimentos serem o seu principal reservatório no meio aquático e fonte secundária de contaminação torna-se relevante determinar os seus teores e identificar as suas fontes.

Os PAHs podem ser classificados quanto ao modo como entram nos ecossistemas: (a) fontes naturais, dependentes da ação da natureza (e.g. atividade vulcânica, incêndios, exsudações de jazidas de petróleo, erosão de sedimentos) ou (b) fontes antropogénicas, resultantes da atividade do Homem (e.g. indústrias, tráfego, queima de biomassa) (Lubecki *et al.*, 2010). Adicionalmente, os PAHs podem ser categorizados quanto à sua formação, considerando as condições a que foram gerados: (a) biogénica e diagenética, ou seja, produzidos por plantas, algas e microrganismos ou no decurso de transformações lentas da matéria orgânica, respetivamente, (b) petrogénica, gerados no decurso da formação do petróleo ou (c) pirogénica (pirolítica), formados por processos de combustão incompleta (e.g. operações industriais, queima de combustíveis fósseis e biomassa) (Stogiannidis e Laane, 2015). Em geral, os PAHs de origem biogénica ou diagenética entram nos ecossistemas por processos naturais enquanto os pirogénicos e os petrogénicos são resultado, maioritariamente, da atividade humana. A introdução de PAHs petrogénicos no meio marinho pode ser feita por fugas em jazidas de petróleo (origem natural) mas é maioritariamente efetuada por meio de derrames ou lavagens e descargas efetuadas pelos navios. Nos grandes centros urbanos, estes PAHs podem também advir das ruas, sendo lixiviados pelas chuvas para os rios. Já os PAHs pirogénicos são emitidos para a atmosfera na fase gasosa ou sob forma de fuligem e entram no meio aquático a partir da deposição direta (Boonyatumanond *et al.*, 2006).

A identificação das fontes emissoras de PAHs é importante pois pode ajudar a limitar a sua introdução nos ecossistemas mas é ao mesmo tempo desafiadora pois, na proximidade dos grandes centros urbanos, existem múltiplas fontes emissoras. A utilização de ferramentas matemáticas e estatísticas aplicadas aos dados analíticos de amostras ambientais tem permitido caracterizar fontes de PAHs (Fang *et al.*, 2003; Boonyatumanond *et al.*, 2006; Lubecki *et al.*, 2010). Das mais usuais destacam-se a avaliação de perfis de distribuição, que permite reconhecer padrões e predominâncias de PAHs característicos de dada origem, a representação de diagramas bidimensionais de razões de diagnóstico, úteis na discriminação entre origem pirogénica e petrogénica e a utilização de métodos multivariados, como a análise de componentes principais (PCA), que possibilita avaliar os fatores que contribuem para a variação química entre agrupamentos de variáveis.

Com este estudo pretendeu-se demonstrar a utilidade das ferramentas acima referidas aplicando-as a um conjunto de dados resultantes da análise de teores de PAHs em sedimentos de diversos ecossistemas marinhos portugueses.

2. AMOSTRAGEM E MÉTODOS

As áreas de estudo incidiram em 4 sistemas estuarinos com focos de pressão antropogénica resultantes de atividades industriais, agrícolas, urbanas e portuárias: Ria de Aveiro, Rio Tejo, Rio Sado e Ria Formosa (Fig. 1). As amostras de sedimento superficial foram colhidas em 2010 com draga do tipo *Petit Ponar* e as amostras de profundidade com vibrocorer elétrico *Rossfeler* P3-C em 2013 (estações T1 e T2, sendo apenas utilizado o sedimento dos 0-100 cm). Todas as amostras de sedimento foram tratadas segundo metodologias internas do Instituto Hidrográfico. Foram analisados, por Cromatografia Gasosa-Espectrometria de Massa, os 16 PAHs prioritários[1], Benzo(e)pireno (BeP), Perileno (Per) e alguns homólogos alquilados do Naftaleno e Fenantreno[2].

[1] PAHs pioritários pela US EPA: Naftaleno (N), Acenaftileno (Acy), Acenafteno (Ace), Fluoreno (F), Fenantreno (Phe), Antraceno (A), Fluoranteno (Fluo), Pireno (P), Benzo(a)antraceno (BaA), Criseno (Chr), Benzo(b)fluoranteno+ Benzo(k)fluoranteno (B(b+k)F), Benzo(a)pireno (BaP), Indeno(1,2,3-cd)pireno (Ind), Dibenzo(a,h)antraceno (DBA) e Benzo(g,h,i)perileno (BghiP).

[2] Metilnaftalenos (C1-N), Dimetilnaftalenos (C2-N), Trimetilnaftalenos (C3-N), Metilfenantrenos (C1-Phe) e Dimetilfenantrenos (C2-Phe).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Distribuição de PAHs

A identificação de fontes, pela análise da distribuição de PAHs, pode ser feita avaliando o seu teor (e.g. discriminado pelo número de anéis) e o teor e forma da distribuição de séries homólogas alquiladas (ascendente, descendente, sino) (Fig. 1).

O petróleo é constituído maioritariamente por PAHs parentais de 2-3 anéis, estando os restantes em teores mais reduzidos. Além disso, é rico em PAHs alquilados, promovendo uma distribuição das séries alquiladas em forma de sino, dada a predominância dos dimetilados, ou sob forma ascendente se houver degradação (e.g. evaporação, dissolução) uma vez que PAHs de menor número de anéis e menor grau de alquilação são os mais afetados (Stogiannidis e Laane, 2015). Nas distribuições características de PAHs pirogénicos há predominância de PAHs parentais em detrimento dos alquilados (padrão decrescente). Além disso, os PAHs de elevado peso molecular, como os de 4-6 anéis, são muito mais abundantes do que os de 2-3 anéis sendo, em geral, o Fluo e o P os mais representativos (Stogiannidis e Laane, 2015).

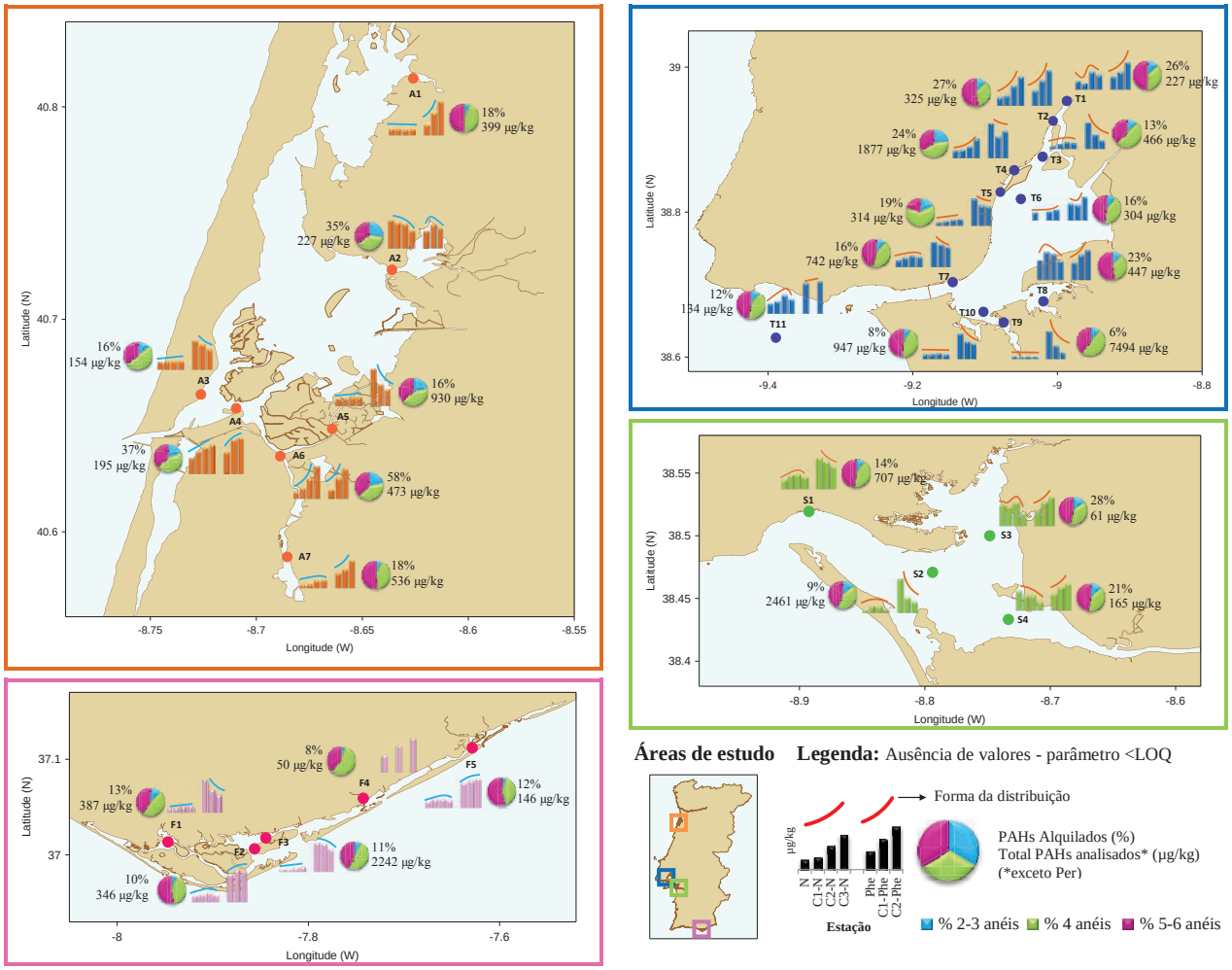


Fig. 1. Estações amostradas e distribuição de PAHs: ● *Ria de Aveiro* ● *Rio Tejo* ● *Rio Sado* ● *Ria Formosa.*

Uma mistura de fontes pode ser encontrada por distribuições enviesadas e sem notórios predomínios de determinados PAHs. Neste estudo (Fig. 1), verifica-se que em todas as estações há predominância dos PAHs parentais de 4-6 anéis apontando para fontes pirogénicas. As estações A5, T9, S2 e F3 apresentam, para cada estuário, os teores mais elevados para o total de PAHs analisados (exceto Per). No entanto, são as estações A4/A6, T1/T2/T8 e S3 as que apresentam maior teor de alquilados rondando os 37/57%, 26/27/23% e 28%, respetivamente. Nestas, a contribuição petrogénica é muito mais sentida que nas restantes, especialmente para a estação A6 que se encontra próximo do porto de Aveiro. Na Ria Formosa, a taxa de PAHs alquilados varia entre 8-13%. Apesar de existirem situações onde se possa observar uma mistura de fontes, de um modo geral a maior contribuição é pirogénica. São notórios baixos teores de PAHs da série homóloga alquilada do naftaleno para algumas estações dos sistemas estudados podendo estar relacionados com ligeira degradação nas amostras.

3.2. *Razões de diagnóstico*

As razões de diagnóstico entre PAHs têm sido amplamente utilizadas para discriminar fontes de PAHs. Esta avaliação é efetuada tendo em consideração PAHs com a mesma razão massa sobre carga, de modo a minimizar diferenças de propriedades dos PAHs como a volatilidade, solubilidade e adsorção. A avaliação é feita através das diferentes estabilidades termodinâmicas tendo em conta os calores de formação dos PAHs (Stogiannidis e Laane, 2015). Além disso, a diferença entre calores de formação dos PAHs participantes no cálculo da razão permite aferir o nível de discriminação entre fontes sendo que, quanto maior essa diferença, mais discriminatória é a razão. Fontes petrogénicas introduzem no meio aquático PAHs mais estáveis, como o Phe, P, Chr e BghiP, pois estes são gerados por processos a baixa temperatura e controlados pelas propriedades termodinâmicas (e.g. formação do petróleo). Já o A, Fluo, BaA e Ind são menos estáveis, gerados a altas temperaturas por combustão incompleta (origem pirogénica) (Stogiannidis e Laane, 2015). Razões como A/(A+Phe), Fluo/(Fluo+P), BaA/(BaA+Chr) e Ind/(Ind+BghiP) são das mais utilizadas, sendo as últimas três empregues para discriminar entre fontes pirogénicas. Quanto à razão A/(A+Phe), esta é útil, em conjunto com Fluo/(Fluo+P), na diferenciação entre fonte petrogénica e pirogénica (Tobiszewski e Namieśnik, 2012).

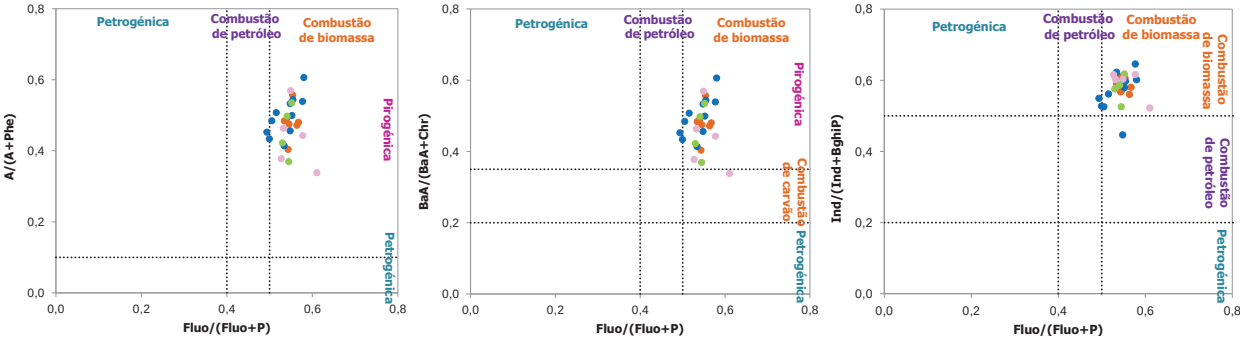


Fig. 2. Razões de diagnóstico e faixas limítrofes (Tobiszewski e Namieśnik, 2012): ● Ria de Aveiro ● Rio Tejo ● Rio Sado ● Ria Formosa.

Na Fig. 2 apresentam-se os gráficos bidimensionais entre as razões de diagnóstico acima referidas, assim como as faixas limítrofes (limites) que permitem a diferenciação de fontes. Da sua análise podemos aferir que a principal fonte são os processos de combustão, na sua maioria devida à queima de biomassa. Porém, para algumas estações do Rio Tejo, poderá existir ainda um reduzido contributo da combustão de petróleo.

O Per tem geralmente origem natural sendo produzido maioritariamente por diagénese, em condições anóxicas, embora possa ser também gerado por processos de combustão ou estar presente no petróleo (Stogiannidis e Laane, 2015). Como meio de provar a sua origem natural, na Fig. 3 estão representadas a composição percentual de Per relativamente ao total de PAHs de 5 anéis ($TPAHs_{5anéis}$-B(b+k)F; BeP; BaP; DBA; Per) e a composição percentual de Per relativamente ao total de PAHs parentais analisados (TpPAHs).

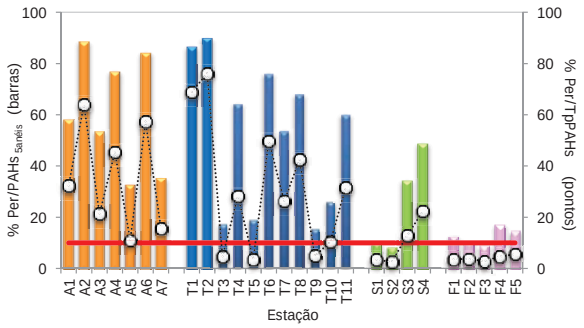


Fig. 3. Composição percentual de Perileno relativamente a $PAHs_{5anéis}$ e a TpPAHs: — Critério de diferenciação entre fontes ● Ria de Aveiro ● Rio Tejo ● Rio Sado ● Ria Formosa.

Os dados revelam que o Per é formado por diagénese dado que a $\%Per/TPAHs_{5anéis}$ excede o critério de 10% (Fang *et al.*, 2009), excetuando-se as estações

S1, S2, F3 e F2. Além disso, para contribuições pirogénicas, a %Per/TpPAHs varia de 1 a 4% (Fang *et al.*, 2009) sendo encontrados neste estudo teores inferiores a 4% para as estações S1, S2 e F3.

3.3. Análise de componentes principais

A análise de componentes principais foi empregue a 27 amostras e 20 variáveis obtendo-se 4 componentes principais que explicam 86,3% da variância total (Tabela I).

Tabela I. Pesos dos fatores dos componentes principais (PC).

Fator	PC1	PC2	PC3	PC4
Variação	50,8%	17,4%	12,5%	5,6%
Fonte	Pirogénica (biomassa) e Biogénica	Dissolução	Pirogénica (petróleo) e Biogénica	Petrogénica
N		*-0,91*		
F			*0,71*	
Phe			*0,94*	
A			*0,87*	
Fluo	0,52		0,58	
P	0,59		0,57	
BaA	0,66		0,47	
Chr	*0,82*			
B(b+k)F	*0,95*			
BaP	*0,86*			
Ind	*0,95*			
DBA	*0,88*			
BghiP	*0,95*			
BeP	*0,97*			
Per	*-0,79*		-0,53	
C1-N		*-0,88*		
C2-N		-0,70		0,58
C3-N				*0,77*
C1-Phe			0,44	0,66
C2-Phe				*0,91*

Itálico: peso >0,70. Foram excluídos da PCA o Acy e o Ace por demonstrarem valores <LOQ para a maioria das estações. Variáveis sujeitas a PCA normalizados relativamente ao total de PAHs analisados.

PC1 explica 50,8 % para a maioria dos PAHs parentais produzidos por processos de combustão (pesos positivos) e de origem biogénica/diagenética (peso negativo). O PC2 explica 17,4 % sendo representado por C0-C2-N estando associado à degradação uma vez que estes PAHs são os mais solúveis na água. Este facto tinha já sido verificado na análise da distribuição de PAHs alquilados e foi já encontrado por outros autores em estudos semelhantes (Fang *et al.*, 2003). Já o PC3 explica 12,5 % e refere-se a PAHs que são provenientes do petróleo mas demonstra pesos medianos e semelhantes aos encontrados no PC1 para o Fluo e P (dos mais abundantes emitidos por processos de combustão). Além disso, neste componente não fazem parte PAHs alquilados comuns no petróleo. Como tal, a este componente pode ser atribuído combustão de combustíveis fósseis. Além disso, o peso negativo mediano relativo ao Per leva a que seja também atribuído a este componente a fonte biogénica/diagenética. Por fim, o PC4 explica 5,6 % apresentando pesos positivos para PAHs alquilados cuja principal proveniência é o petróleo.

4. CONCLUSÕES

Este estudo envolveu a identificação de fontes de PAHs a partir de uma combinação de tratamentos matemáticos e estatísticos aos seus teores.

As características da distribuição de PAHs juntamente com a representação de razões de diagnóstico com faixas limítrofes que diferenciam fontes emissoras permitiram averiguar que, para a maioria das estações, a principal fonte é a pirogénica (queima de biomassa e de combustíveis fósseis, em menor escala). Algumas estações próximas de portos/docas (e.g. A6, T1 e T2) denotam uma ligeira assinatura petrogénica. A análise de componentes principais veio fundamentar melhor as constatações já evidenciadas comprovando a diferenciação entre variáveis que explicam as três fontes acima mencionadas.

Assim, conclui-se que este tipo de abordagem aos dados fornece informação distinta mas que se complementa tornando-se vantajosa na identificação da origem de PAHs.

REFERÊNCIAS

Boonyatumanond, R.; Wattayakorn, G.; Togo, A.; Takada, H. (2006). Distribution and origins of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in riverine, estuarine and marine sediments in Thailand. *Marine Pollution Bulletin*, 52, 942-956.

Fang, M.; Lee, C.; Yu, C. (2003). Distribution and source recognition of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of Hsin-ta Harbour and adjacent coastal areas, Taiwan. *Marine Pollution Bulletin*, 46, 941-953.

Lubecki, L. e Kowalewska, G. (2010). Distribution and fate of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in recent sediments from the Gulf of Gdańsk (SE Baltic). *Oceanologia*, 52, 669-703.

Stogiannidis, E. e Laane, R. (2015). Source characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons by using their molecular indices: an overview of possibilities. En: Whitacre, D.M. (ed.). *Reviews of environmental contamination and toxicology volume 234*. Springer, Switzerland, 49-133.

Tobiszewski, M. e Namieśnik, J. (2012). PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources. *Enviromental Pollution*, 162, 110-119.

ValorSul - Monitorização Ambiental de Sedimentos (2004-2015)

M. Valença(1), A. Gama (1), C. Palma (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa; manuela.valenca@hidrografico.pt

Resumo: O Instituto Hidrográfico desenvolve um programa de monitorização da zona estuarina envolvente à área de implantação da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos da região de Lisboa desde 1999. O referido programa avalia a qualidade ambiental em função dos resultados de diversos parâmetros nas matrizes água e sedimento em quatro pontos distintos, três situados no próprio estuário (La1, La2 e La3) e outro situado na vala de escoamento (vala de drenagem - Lb). Neste trabalho, apresentam-se os resultados da composição granulométrica, carbono orgânico total e metais em amostras de sedimento de superfície colhidas no período 2004 a 2015 e amostras de profundidade colhidas em 2004.

Os teores de metais nos sedimentos foram mais elevados nas estações La3 e Lb, o que está relacionado com a maior afinidade que aqueles compostos exibem para a fração fina dos sedimentos, comparativamente à fração grosseira. De acordo com a Portaria nº 1450/07 pode-se classificar os sedimentos do estuário (La1, La2 e La3) como Classe 1 – material dragado limpo e na Classe 2 – material dragado com contaminação vestigiária. Verifica-se que não há diferenças significativas em termos de metais nos sedimentos das estações La1, La2 e La3.

Palavras-chave: Sedimentos, metais, distribuição espácio-temporal, geoquímica.

1. INTRODUÇÃO

O Instituto Hidrográfico efetua, desde 1999, um programa de monitorização da zona estuarina envolvente à área de implantação da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos da região de Lisboa. Este programa contempla a avaliação de parâmetros físico-químicos em águas e sedimentos. Os sedimentos desempenham um papel relevante como reservatórios para os contaminantes, constituindo um indicador de avaliação da qualidade do ambiente marinho. De modo a avaliar a qualidade dos sedimentos, em termos de contaminação por metais pesados, foram aplicadas as seguintes abordagens:

– Comparação dos teores de arsénio (As), cádmio (Cd), crómio (Cr), mercúrio (Hg), cobre (Cu), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn) com os valores apresentados na Portaria nº 1450/2007, de 12 de novembro, que classifica os sedimentos de acordo com o seu grau de contaminação em metais e compostos orgânicos, no âmbito das operações de dragagem e eliminação de inertes por deposição ou imersão;

– Comparação com os Critérios de Avaliação Ambiental (EACs) (OSPAR, 2008) que estabelecem valores abaixo dos quais as espécies marinhas estão protegidas de efeitos crónicos (*LOWER EAC*) e valores máximos para os quais se espera que não promovam efeitos tóxicos (*UPPER EAC*);

– Comparação com os valores de *Background* (OSPAR, 2008), cujos teores em metais são normalizados com o Al e recalculados para uma composição de 5% do normalizador;

– Determinação do Fator de Enriquecimento (FE) e do Índice de Geoacumulação (Igeo) que comparam os níveis atuais com níveis pré-industriais (Vale *et al.*, 2008). Estes dois índices podem ser determinados segundo as seguintes expressões:

$$FE = \frac{(C_i^{Sed}/C_{Al}^{Sed})}{(C_i^{BG}/C_{Al}^{BG})} \qquad Igeo = log_2\left(\frac{C_i^{Sed}}{1{,}5 \times C_i^{BG}}\right)$$

onde C_i^{Sed} e C_{Al}^{Sed} são as concentrações do metal e de alumínio, respetivamente, no sedimento avaliado e C_i^{BG} e C_{Al}^{BG} são as concentrações de *Background* do metal e de alumínio, respetivamente.

Neste trabalho apresentam-se os resultados dos metais, a análise granulométrica e o carbono orgânico total em sedimentos superficiais e em amostras de profundidade, de modo a detetar possíveis contribuições antropogénicas.

2. AMOSTRAGEM E MÉTODOS

Os sedimentos superficiais (•) foram amostrados em três estações situadas no estuário (La1, La2 e La3) e outra na vala de drenagem (Lb) no período 2004 a 2015. Em fevereiro de 2004 foi efetuada uma amostragem de três testemunhos de sedimentos de profundidade (•) (V1, V2 e V3) (Fig. 1). A colheita de sedimentos superficiais foi efetuada com um colhedor Smith-McIntyre, e as amostras de profundidade com um vibrocorer elétrico Rossfelder P3-C.

Após a colheita as amostras foram fracionadas com um peneiro <2 mm, congeladas a -18ºC, secas por liofilização e homogeneizadas num moinho de ágata.

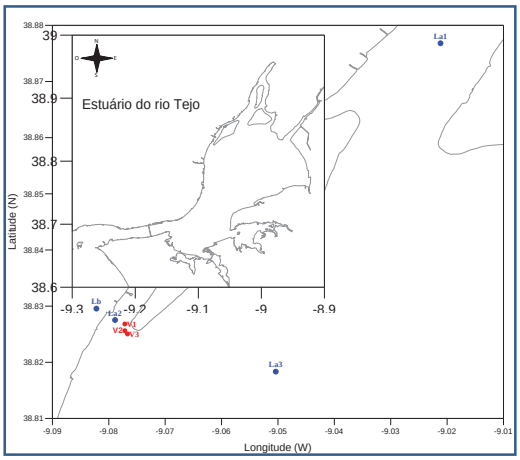


Fig. 1. Localização das estações de amostragem de superfície (•) e de profundidade (•) no Tejo e na vala de drenagem.

A granulometria foi determinada pelo método de peneiração em partículas na ordem dos 500 µm e pelo método de difração laser em partículas entre 0,02 µm a 2 mm. A determinação do carbono total (TC) foi efetuada num espectrómetro de absorção de infravermelho não dispersivo; o carbono inorgânico total (TIC) segue o mesmo procedimento após acidificação das amostras de sedimento com H_3PO_4. O Carbono Orgânico Total (COT) foi calculado por diferença entre o TC e o TIC. Os metais foram quantificados após digestão total (ácidos fortes) em micro-ondas ETHOS PLUS e quantificados por Espectrometria de Absorção Atómica (EAA) com Chama, com exceção do As - gerador de hidretos e do Hg - EAA – vapor frio. O laboratório rege-se por um controlo de qualidade rigoroso, utilizando materiais de referência certificados (MRC) e participando, desde 1993, nos exercícios interlaboratoriais QUASIMEME.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Amostras de profundidade

A granulometria é um dos fatores mais importantes que controla a distribuição dos metais nos sedimentos. Apresenta-se na Figura 2 a distribuição dos teores da fração fina (< 63 µm; silte+argila) ao longo do core V2, assim como a composição granulométrica em termos de cascalho, areia, silte (gráfico de bolas). Verifica-se uma diferença significativa na composição textural da amostra até aos 13cm e depois dos 13 cm.

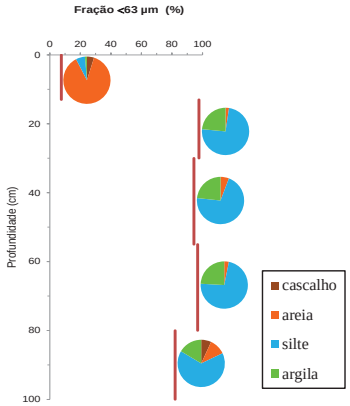


Fig. 2. Distribuição dos teores da fração fina (< 63 µm; silte+argila) ao longo do core V2; composição granulométrica das frações cascalho, areia, silte e argila.

Na Figura 3 apresenta-se a distribuição do COT e dos metais Al e Fe; na Figura 4 apresenta-se a distribuição dos metais As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb e Zn nos sedimentos amostrados em profundidade, nos pontos V1, V2 e V3. Verifica-se, para o core V2, que os teores em metal aumentam a partir dos 13 cm, o que está relacionado com o aumento da fração fina, na qual os metais têm uma afinidade superior. No core V1 verifica-se uma diminuição no teor em metais aos 5 cm, enquanto no core V3 não há alterações significativas.

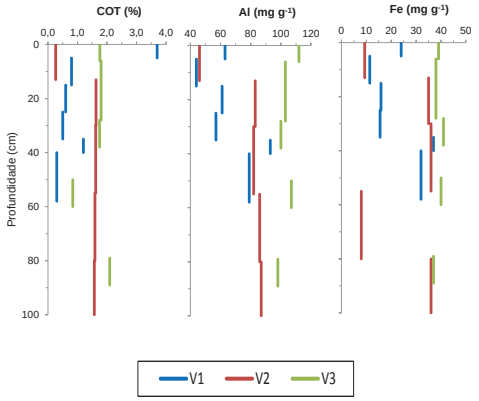


Fig. 3. Teores do carbono orgânico total, alumínio e ferro nos sedimentos de profundidade.

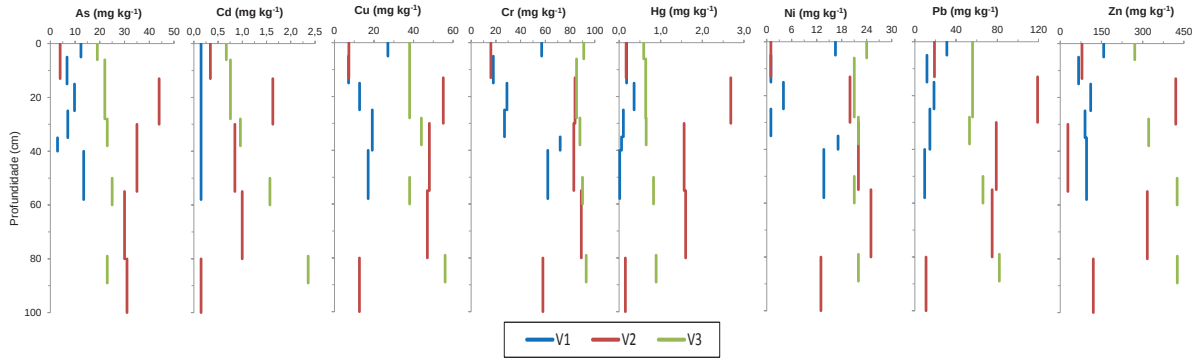


Fig. 4. Teores de arsénio, cádmio, crómio, cobre, mercúrio, níquel, chumbo e zinco, nos sedimentos de profundidade.

3.2 Amostras superficiais

Na Figura 5 apresenta-se a percentagem da fração <63 µm (silte+argila) nos sedimentos amostrados no período 2004-2015, em termos de mediana (*median*), intervalos de aceitação (25-75% e *Range*) e de valores aberrantes (*Outliers e Extremes*).

Verifica-se que as estações La1 e La2 apresentam um comportamento semelhante para a fração <63 µm, classificando-se, segundo Shepard, como areia. Nas estações La3 e Lb verifica-se uma maior variação nos valores ao longo do tempo. Apresenta-se na Figura 6 a distribuição dos metais e respetiva classificação quanto ao grau de contaminação de acordo com o disposto no Anexo III da Portaria nº 1450/07.

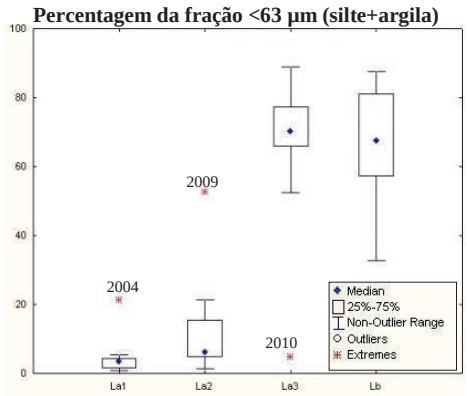


Fig. 5. Mediana (median), intervalos de aceitação (25-75% e Range) e valores aberrantes (Outliers e Extremes) da percentagem <63 µm (silte+argila.

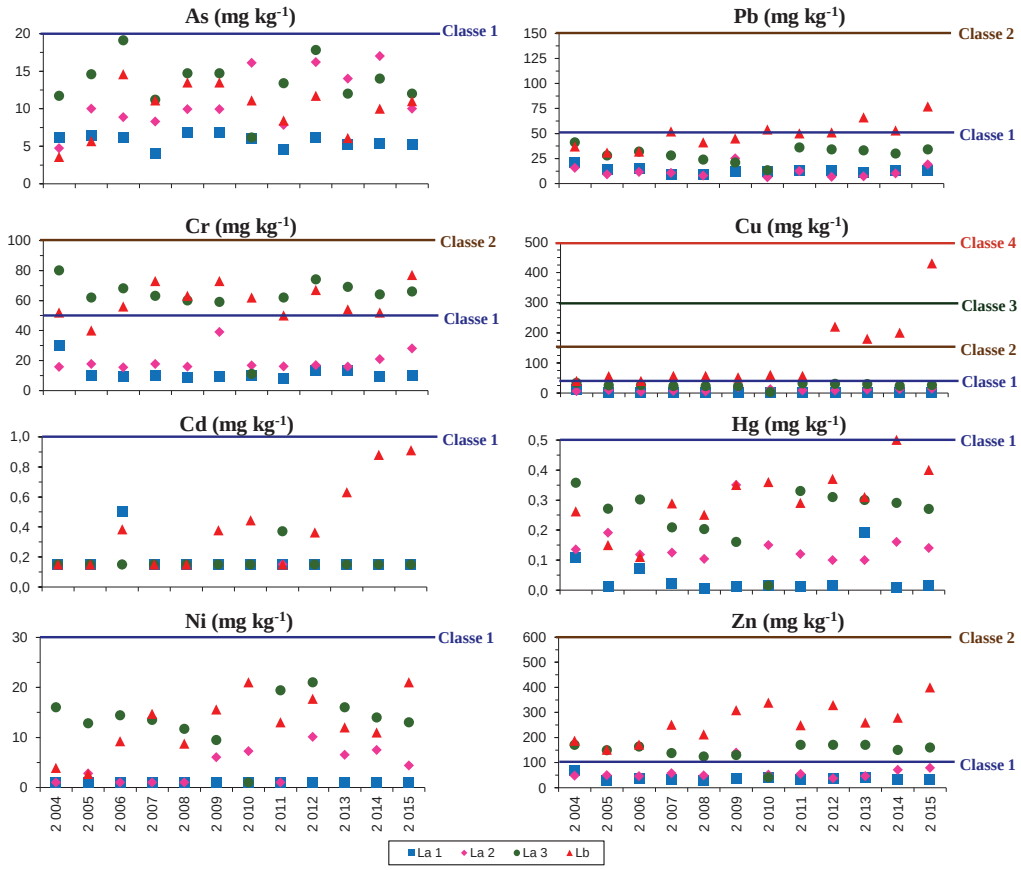


Fig. 6. Teores de arsénio, cádmio, crómio, cobre, mercúrio, níquel, chumbo e zinco, nos sedimentos e sua classificação de acordo com a Portaria nº 1450/07.

Verifica-se que os teores encontrados em cada estação são da mesma ordem de grandeza. São exceção os teores encontrados para o Cu, nos anos de 2012 a 2015, da estação Lb onde se verifica um aumento destes teores. Os teores dos metais mais elevados foram encontrados nas estações La3 e Lb, podendo estes valores estarem relacionados com a afinidade dos diversos contaminantes às partículas finas.

A comparação com os critérios de avaliação ambiental e com valores de *background* (OSPAR, 2008) só será efetuada com as amostras estuarinas (La1, La2 e La3). Na Tabela I apresentam-se as concentrações de referência (OSPAR, 2008) e também as razões recalculadas pelo mesmo método, utilizando o valor da mediana. A laranja estão representados os valores superiores às concentrações de referência.

Tabela I. Valores de background da OSPAR (2008) e valores da mediana, calculados para as amostras estuarinas.

	As (mg kg^{-1})	Cr (mg kg^{-1})	Cu (mg kg^{-1})	Hg (mg kg^{-1})	Ni (mg kg^{-1})	Pb (mg kg^{-1})	Zn (mg kg^{-1})
OSPAR[a]	**15**	**60**	**20**	**0,5**	**45**	**25**	**90**
La1	8,73	14,2	3,57	0,02	<2	17,8	49
La2	10,9	18,5	9,58	0,14	3,96	11,3	57
La3	10,5	48	19,5	0,21	10,5	24	118

Na Tabela II apresentam-se os critérios de avaliação ambiental e os valores máximos e mínimos estando com a cor laranja os valores superiores aos *EAC-High*.

Tabela II. Critérios de avaliação ambiental (EAC) e teores mínimo e máximo dos metais do estuário em 2004 a 2015.

Parâmetro	EAC-*Low* [a] (mg kg^{-1})	EAC-*High* [a] (mg kg^{-1})	Mínimo (mg kg^{-1})	Máximo (mg kg^{-1})
As	1	10	3,58	19,1
Cd	0,1	1	<0,3	0,504
Cu	5	50	<5	33
Cr	10	100	7,79	80
Hg	0,05	5	0,0075	0,357
Ni	5	50	<2	21
Pb	5	50	6,28	41
Zn	50	500	27	170

[a]OSPAR Commission, 2008.

Verifica-se, pela Tabela I, que as razões calculadas são inferiores aos valores de *Background* com exceção do Zn na estação La3. De acordo com a Tabela II, verifica-se que os elementos Cd, Cr, Cu, Hg, Ni e Zn registaram teores inferiores ao *EAC-High*, havendo valores individuais inferiores ao *EAC-Low*. O teor máximo de As ultrapassa o respetivo *EAC-High*. Na Tabela III apresentam-se os FE usando valores de referência definidos por Taylor and McLennan (1995). Verifica-se que o As, em todas as estações, e o Cr, Pb e Zn, na estação La3, apresentam valores provenientes de fontes antropogénicas.

Tabela III: Fator de Enriquecimento (FE).

	Taylor and McLennam, (1995)					
	As	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
La1	9,4	0,7	0,2	0,1	1,4	1,1
La2	11,7	0,9	0,6	0,3	0,9	1,3
La3	11,2	2,2	1,3	0,8	1,9	2,7
FE <0,5 mistura de camadas com sedimentos menos contaminados FE entre 0,5 e 1,5 metal proveniente de fontes naturais FE < 1,5 metal proveniente de fontes antropogénicas						

Na Tabela IV apresentam-se os Igeo utilizando valores de referência definidos por Taylor and McLennan (1995) e por Vale *et. al* (2008) sendo o grau de poluição classificado de acordo com Műller (1979).

Tabela IV: Comparação dos Índices Geoquímicos.

	Taylor and McLennam, (1995)						Vale *et al.* (2008)					
	As	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
La1												
La2												
La3												
● praticamente não poluído; ● não poluído a moderadamente poluído; ● moderadamente poluído; ● moderadamente a fortemente poluído;												

Sendo os valores de referência diferentes, a classificação do sedimento em termos de poluição também difere. O cálculo do Igeo para o As segundo Taylor and McLennam (1995), origina resultados com estações moderadas e fortemente poluídas, enquanto a aplicação do mesmo índice de acordo com Vale *et al.* (2008), essas mesmas estações são designadas como não poluídas a moderadamente poluídas.

4. CONCLUSÕES

A distribuição espacial dos metais está correlacionada com a fração inferior a 63 µm nos sedimentos, pois verifica-se que as estações La3 e Lb, com concentrações em metal mais elevadas, apresentam uma percentagem de finos também mais elevada. De acordo com a Portaria nº 1450/07 pode-se classificar como Classe 1 – material dragado limpo e Classe 2 – material dragado com contaminação vestigiária os sedimentos analisados. Tendo em consideração os valores de *Background* e os critérios de avaliação ambiental definidos pela OSPAR em 2008, e utilizando as medianas da concentração dos metais, verifica-se que o Zn na estação La3 apresenta valores superiores aos referidos. A aplicação das metodologias FE e Igeo deve ser encarada com precaução, uma vez que para cada uma são utilizados valores de *background* que podem não ser os mais adequados ao estudo do estuário em causa. Os valores de *background* utilizados podem variar de região para região, uma vez que estes valores estão associados à constituição da crosta no local em estudo. O cálculo do Igeo para o As segundo Taylor and McLennam (1995), origina resultados com estações fortemente poluídas, enquanto a aplicação do mesmo índice de acordo com Vale *et al.* (2008), essas mesmas estações são designadas como praticamente não poluídas. Em relação aos outros metais não se verificam diferenças entre estes autores. Os resultados obtidos nos cores analisados, com teores de metais na camada superficial inferiores às camadas mais fundas, pode ser justificado com possível assoreamento nesse local. O estudo efetuado permite concluir que não há diferenças significativas nos teores dos metais nos sedimentos do estuário (La1, La2 e La3).

Agradecimentos

Agradece-se à Valorsul, S.A a autorização para o uso dos dados utilizados no presente trabalho.

REFERÊNCIAS

Műller, G., (1979) Schwermetalle in den sedimenten des RheinsdVera¨nderungen seitt 1971. Umschan 79, 778–783.

Portaria nº 1450/2007. D.R. I Série, 217 (07-11-12) 8372-8382.

OSPAR Commission - CEMP Assessment Manual, (2008). Co-ordinated Environmental Monitoring Programme-Assessment manual for contaminants in sediments and biota. OSPAR Commission, 39 pp.

Shepard, F. 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. Journal of Sedimentary Petrology 24: 151–158.

Taylor, S.R., McLennan, S.M., (1995). The geochemical evolution of the continental crust. Reviews in Geophysics 33, 241–265.

Vale, C., Canário, J.; Caetano, M.; Lavrado, J.; Brito, P., (2008) Estimation of the anthropogenic fraction of elements in surface sediments of the Tagus Estuary (Portugal) Marine Pollution Bulletin 56, 1353–1376.

Evolução temporal das propriedades físicas e químicas do baixo estuário do rio Arade, 2015-2016

C. Correia (1), A. Cravo (1) e J. Jacob (1)

(1) CIMA, FCT, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro. cfrcorreia91@hotrmail.com

Resumo: Os estuários representam sistemas de transição entre ambientes de água doce e marinhos, reconhecidos como sistemas produtivos do ponto de vista biológico. Estes proporcionam importantes *habitats* para a vida aquática e de proteção para muitas espécies. São também sistemas muito procurados pelo Homem e como tal são afetados por pressão antropogénica. A quantidade de água doce que entra nos estuários pelo rio influencia a ecologia desses sistemas, promovendo gradientes e variabilidade ao longo da sua extensão. O rio Arade é o segundo rio mais importante da costa algarvia. O seu estuário é influenciado pela descarga de água doce do rio e está sujeito a uma pressão antropogénica elevada. Este trabalho pretende contribuir para melhorar a compreensão da variabilidade anual das propriedades físicas e químicas neste estuário. Para tal foi avaliada a variação das características físicas e químicas ao longo do baixo estuário, através da realização de campanhas estacionais representativas do ciclo anual.

Palavras-chave: Rio Arade, baixo-estuário, sólidos em suspensão, nutrientes, clorofila *a*, ciclo anual.

1. INTRODUÇÃO

Os estuários são zonas de transição entre os ambientes de água doce e marinhos, que são caracterizadas por condições físicas e químicas muito variáveis no tempo e no espaço, resultantes da mistura das correntes de descarga fluvial com o oceano adjacente (Fujii, 2007). Estes ambientes são reconhecidos como sistemas produtivos do ponto de vista biológico, proporcionando importantes habitats para a vida selvagem local e de proteção para muitas espécies. São também ecossistemas muito procurados pelo Homem por fornecerem vários serviços (Barbier et al., 2011). No entanto, as diversas pressões antropogénicas podem causar alterações da sua qualidade, apesar da sua elevada resiliência. Atualmente, o seu estudo torna-se cada vez mais estimulante quer para avaliação do impacto do aumento das taxas de entrada de nutrientes e de outros contaminantes, e alterações dos seus ciclos biogeoquímicos, quer por alterações climáticas, capazes de modificar os seus regimes hidrológicos (Statham, 2012). A monitorização destas áreas costeiras é, portanto, essencial para determinar a qualidade ambiental destes locais. No caso particular do rio Arade, na costa sul de Portugal, a variabilidade físico-química deste ecossistema está deficitariamente estudada, pois os trabalhos neste âmbito ou de monitorização de qualidade da água são escassos. Assim, o objetivo deste trabalho foi contribuir para melhorar a compreensão da variabilidade anual das propriedades físicas e químicas ao longo do seu baixo estuário. Para tal foi avaliada a variação das características físicas e químicas através da realização de campanhas estacionais representativas do ciclo anual.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local de amostragem e campanhas

O rio Arade (Fig. 1) é o segundo principal rio da costa algarvia (Gomes, 2013) . Este nasce na Serra do Caldeirão, percorre 75 km até à sua foz, junto à cidade de Portimão e tem uma bacia de drenagem de 966 km^2 (SNIRH, 2013). O estuário do rio Arade apresenta regime meso-mareal, havendo intrusão de água salgada até 16 km para montante da foz. Tem uma profundidade média de 6 m e máxima de 10 m próximo à cidade de Portimão (MARETEC, 2014). Para caracterização do baixo estuário, foram previamente selecionadas 8-9 estações de amostragem ao longo de uma distância entre 7 e 10 km da foz. De forma a perceber a variabilidade físico-química nesta área de estudo, selecionou-se o nível superficial, onde a influência de água doce é maior.



Fig. 1. Localização da área de amostragem - estuário do rio Arade e zonas populacionais que o rodeiam.

Para avaliar a evolução da variabilidade sazonal das propriedades físicas e químicas do baixo estuário,

foram realizadas quatro campanhas oceanográficas: primavera (27 de março de 2015), (final) verão (25 de setembro de 2015), outono (30 de outubro de 2015) e inverno (29 de fevereiro de 2016), após um período de chuva forte de forma a ser representativa de um período de drenagem intenso.

2.2. Métodos

Foram medidos *in situ* os parâmetros: temperatura, salinidade, pH e oxigénio dissolvido (em concentração e percentagem de saturação), através de uma sonda multiparamétrica YSI 6820, calibrada antes de cada campanha com soluções padrão. Foram recolhidas amostras de água (1 L) à superfície (< 20 cm) para a análise de nutrientes (amónia, nitratos + nitritos, fosfatos e silicatos). Estas amostras foram filtradas através de um filtro Gelman de 0,45 µm, previamente descontaminado e pesado, para determinação de sólidos em suspensão, SS. Depois de filtradas, as amostras foram posteriormente congeladas a -20º C. Os filtros para SS foram pesados depois de secos durante 1 hora a 100º-105º C. Para determinação da concentração de clorofila *a* foram recolhidas amostras de água superficial (2 L), filtradas em filtros de fibra de vidro GF/F (0,7 µm de porosidade) e congelados a -20ºC até à sua análise. Para a determinação de nutrientes e clorofila *a* foram aplicados os métodos espetrofotométricos descritos por Grasshoff *et al*. (1983) e Lorenzen (1967), respetivamente, enquanto para a determinação dos SS se aplicou o método gravimétrico descrito por A.P. H. A. *et al*. (1992).

2.3. Tratamento de dados

Para determinar o estado trófico das várias estações amostradas nas várias campanhas foi usado o índice trófico TRIX (Vollenweider *et al.*, 1998) que integra quatro variáveis de estado que refletem a qualidade da água, o desvio absoluto da saturação de oxigénio, clorofila *a*, concentração de azoto e fósforo. Este índice expressa-se pela seguinte fórmula

$$TRIX = \frac{[\log_{10}(Chl\ a \times a\%DO \times DIN \times DIP) - (-1.5)]}{1.2}$$

em que Chl *a* – concentração de clorofila *a* (µg L^{-1}), a%DO – desvio absoluto da saturação de oxigénio (%), DIN – azoto inorgânico dissolvido (µM) e DIP – fósforo inorgânico dissolvido (µM).

A classificação das águas usando o índice TRIX foi feita através de valores limiares propostos por Penna *et al.*, (2004), em que o índice foi dimensionado numa escala de 0-10 (< 4 – Oligotrófico (estado trófico) e Muito Bom (estado de qualidade); [4-5[Mesotrófico ou Bom; [5-6[Eutrófico ou Moderado; [6-10[Hipertrófico ou Pobre).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as quatro campanhas, os parâmetros medidos *in situ* estão representados na Figura 2. A temperatura variou entre 13º C no Inverno e 17.5º C no Verão, mostrando uma tendência de aumento para as estações mais a montante (Fig. 2a). A salinidade variou entre 16.7 na campanha de inverno e 36 na de outono. A salinidade mínima, em todas as estações, foi medida na campanha de inverno, o que reflete a chuva que se fez sentir nos dias anteriores à campanha. Já na campanha de outono, pelo facto de a taxa de evaporação ser elevada, num período ainda seco durante o final do mês de outubro, a salinidade foi globalmente mais elevada. Para este parâmetro, nas várias campanhas observou-se uma diminuição para as estações mais a montante do estuário (Fig. 2b). Nas campanhas de verão e de outono este gradiente foi menos acentuado pela menor contribuição do caudal do rio. A saturação de oxigénio variou entre 85% e 110 %, globalmente mais baixa na campanha de outono e mais elevada na de verão. Tal como para a salinidade, ocorreu uma diminuição da foz para montante (Fig. 2c). Tal facto pode ser justificado por ocorrer uma maior oxigenação junto da zona costeira adjacente, característica de águas com baixa concentração de matéria orgânica. Relativamente ao pH (não mostrado), os valores mantiveram-se relativamente constantes, entre 7.9 e 8.2, com tendência para diminuir para as estações mais a montante.

Quanto aos nutrientes (Fig. 2d-h), de uma forma geral, a água ao longo do estuário apresentou concentrações gradualmente mais elevadas a montante em relação à foz, tal como é típico das zonas estuarinas (Statham, 2012). O padrão de variação destes compostos foi oposto ao da salinidade, i.e., os valores mais elevados de concentração correspondem aos de salinidade mais baixa. No caso da amónia (NH_4^+, Fig. 2d), a concentração variou entre níveis não detetados na campanha de outono e >20 µM nas campanhas de primavera e inverno, particularmente na estação mais próxima do ponto de descarga da ETAR da Companheira, a ~4 km da foz. As ETAR normalmente representam uma fonte deste composto de azoto pela decomposição recente de matéria orgânica, que ainda não teve tempo de sofrer nitrificação. Os nitratos e nitritos (NO_3^- e NO_2^-) apresentaram concentrações entre níveis não detetáveis e ~80 µM (Fig. 2e). O aumento significativo dos valores mais elevados registados nas campanhas de outono e de inverno corresponde a um local onde ocorre confluência de uma fonte de água doce, conhecida como as Fontes de Estômbar. Nesse local, a diminuição acentuada do valor de salinidade encontrado e a magnitude do valor máximo de nitratos parece indicar alguma influência de afloramento de águas subterrâneas do aquífero Querença-Silves, existente nesta zona. É referido na literatura que descargas de água subterrâneas (SGD) são uma forte fonte potencial de N, P e Si para os estuários (Jickells, 2005; Statham, 2012). O fosfato (PO_4^{3-}- Fig. 2f) variou entre 0.2 e 1.5 µM, tendo os valores mais altos sido registados na estação mais

próxima da ETAR da Companheira, praticamente em todas as estações do ano, tal como para a NH_4^+. Tal facto é expectável já que as ETAR, pela abundância em detergentes e decomposição de matéria orgânica, representam uma fonte de origem antropogénica deste composto (Statham, 2012). No entanto, sazonalmente as concentrações mais elevadas corresponderam à campanha de inverno e as mais baixas à de outono. Tal como os nitratos, os silicatos (SiO_4^{4-}), também apresentaram concentrações mais elevadas nas campanhas de inverno e outono junto à estação mais próxima das Fontes de Estômbar (~60 µM). Sazonalmente, à exceção deste local, as concentrações mais baixas (não detetável) foram encontradas na campanha de outono (Fig. 2g).

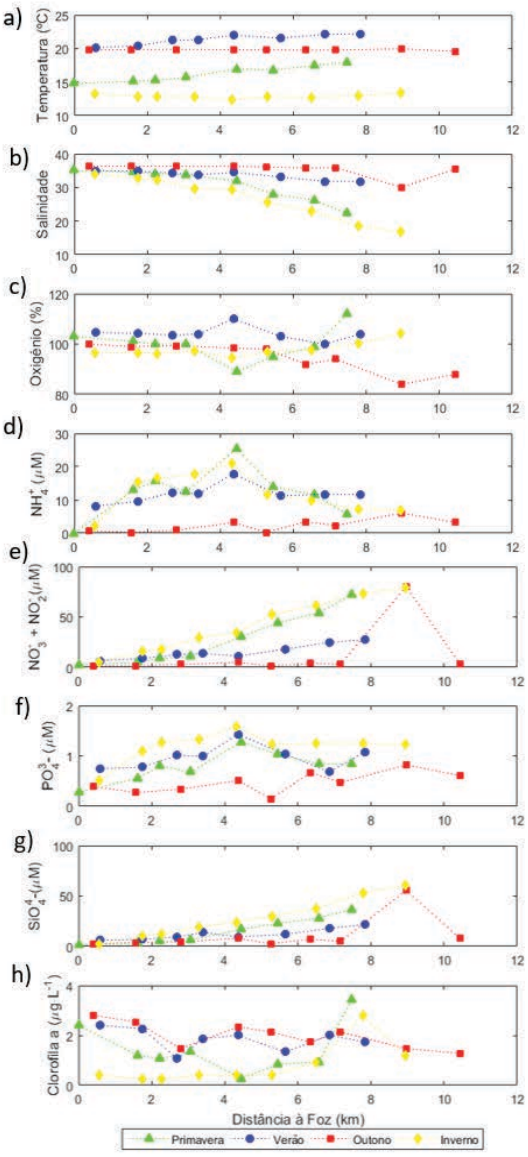


Fig. 2. Variação sazonal (primavera, verão, outono e inverno) de a) Temperatura, b) Salinidade, c) Percentagem de saturação O_2, e concentração de d) NH_4^+, e) $NO_3^- + NO_2^-$, f) PO_4^{3-}, g) SiO_4^{4-} e h) Chl a nas estações amostradas ao longo do rio Arade.

Resumindo, relativamente às estações do ano, os nutrientes tiveram concentrações mais elevadas durante o inverno, quando a salinidade foi mais baixa. Tal pode dever-se à ocorrência de chuva e escorrências, quer difusas de terra e drenagem do rio (contaminação de fertilizantes agrícolas) quer da fonte pontual como é a ETAR (por aumento de caudal) que fazem aumentar os silicatos, nitratos, amónia e fosfatos. As concentrações mais baixas foram encontradas, globalmente, na campanha de outono. Isto pode estar relacionado com o valor mais elevado de salinidade, representando uma menor contribuição do caudal do rio. No entanto, também pode relacionar-se com o consumo dos nutrientes por parte do fitoplâncton, máximo nas campanhas de verão e de outono, como se pode ver no gráfico da clorofila *a* (Fig. 2h).

Para se avaliar o estado trófico do baixo estuário do Arade, aplicou-se ainda o índice Trófico TRIX aos dados de todas as estações de amostragem para as quatro estações do ano, que agrega a informação sobre as concentrações de azoto e fósforo, clorofila *a* e desvio absoluto da saturação de oxigénio. Estes dados revelam que a qualidade da água era muito boa (oligotrófica; I< 4), exceto na estação mais próximo das Fontes de Estômbar, que a qualidade era boa (I = 4-5).

Todavia, para se entender melhor a variabilidade da qualidade da água ao longo do estuário, é necessário ter em atenção a fase de maré quinzenal e do ciclo semidiurno em que cada campanha foi realizada. Nas campanhas de outono e inverno, o estuário foi amostrado em situação de enchente de maré viva, o que potenciou a contribuição da água do mar na mistura das duas massas de água e pode mascarar alguma da contaminação do rio em nutrientes, devido ao forte efeito de diluição da maré, tendo em conta que se tratou de uma maré muito viva. Na altura da campanha do outono a contribuição máxima de água doce representou 17% enquanto no inverno foi substancialmente maior, 52%.

Através da aplicação da linha teórica de diluição (LTD) para os nutrientes foi possível verificar que apenas os nitratos e os silicatos tiveram um comportamento conservativo (Fig. 3). Esta técnica permite estimar a concentração de nutrientes no rio, S=0, mostrando que a concentração de SiO_4^{4-} ronda valores típicos (~100-200 µM), apesar dos mais elevados corresponderem às campanhas de outono e verão. Para os nitratos parece haver contaminação no rio, já que para as quatro campanhas, as concentrações deste parâmetro foram elevadas, variando entre ~80-200 µM, com os valores mais elevados nas campanhas de primavera e de verão. Este facto pode dever-se ao aumento sazonal de pressão antropogénica que se faz sentir na bacia de drenagem da área estudo, quer por influência urbana, quer agrícola ou mesmo de suiniculturas (Cheng and Couto, 2006).

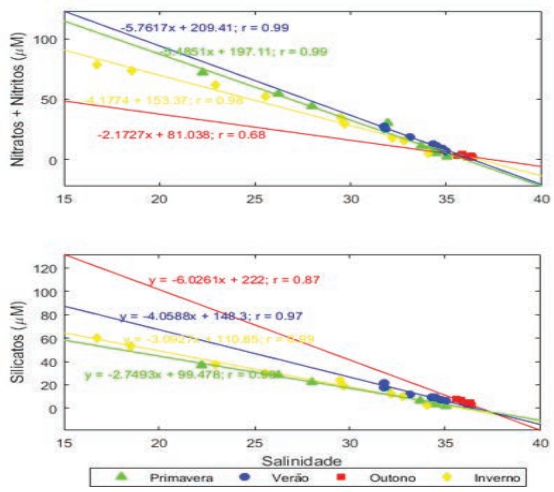


Fig. 3. Variação sazonal (primavera, verão, outono e inverno) da concentração de a) Nitratos + Nitritos e (b) de silicatos com a salinidade ao longo do baixo estuário.

4. CONCLUSÃO

Os resultados mostraram uma forte variabilidade espacial e temporal. Dos parâmetros analisados, a salinidade, como indicador da mistura no estuário é o parâmetro mais importante para explicar esta variabilidade. Assim, as concentrações de nutrientes aumentaram para montante, pela maior contribuição da mistura de água doce. No entanto, estes dados também mostraram que na área de estudo, há fontes externas de nutrientes que alteram a sua qualidade como é o caso da estação junto da ETAR (amónia, fosfatos) e da que fica perto das Fontes de Estômbar (nitratos e silicatos). Sazonalmente, os valores mais elevados foram encontrados na campanha de inverno, devido a uma maior contribuição da fonte de água doce, em oposição à situação de outono. Relativamente ao estado trófico das estações amostradas no baixo estuário, a qualidade da água pode considerar-se muito boa a boa para todas as estações do ano. Relativamente às estimativas dos nutrientes no rio pela LTD, para os nitratos a pressão antropogénica no estuário parece se fazer sentir com maior intensidade no período primavera-verão, refletindo a sua flutuação sazonal.

Agradecimentos

Os autores agradecem à APSines – Administração dos Portos de Sines e do Algarve, S. A. e em particular à Engª Filipa Duarte pelo apoio logístico disponibilizado nas Campanhas de Verão e de Inverno, e a toda a equipa que participou nas campanhas realizadas.

REFERÊNCIAS

American Public Health Association, American Water Works Assocoation, Water Environment Federation, (1992). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Maryland, USA.

Barbier, E.B., Hacker, S.D., Kennedy, C., Koch, E.W., Stier, A.C., Silliman, B.R., (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs* 81, 169–193.

Cheng, C.Y., Couto, V., (2006). Simulação do Fósforo Originado de Fontes Difusas Na Bacia Hidrográfica do Arade no Algarve Utilizando um Modelo Matemático de WinHSPF, in: 1ªs Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos E Ambiente. pp. 101–109.

Fujii, T., (2007). Spatial patterns of benthic macrofauna in relation to environmental variables in an intertidal habitat in the Humber estuary, UK: Developing a tool for estuarine shoreline management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 75, 101–119.

Gomes, A.I., (2013). Alterações Ambientais na Costa Algarvia Durante o Holocénico: Um Estudo com base em Diatomáceas. Universidade do Algarve.

Grasshoff, K., Erkhardt, M., Kremling, K., (1983). *Methods of Seawater Analysis*. Verlag Chemie, New York.

Jickells, T., (2005). External inputs as a contributor to eutrophication problems. *Journal of Sea Research* 54, 58–69.

Lorenzen, C., (1967). Determination of chlorophyll and pheopigments:spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography* 12, 343–346.

MARETEC (2014). Definição do limite jusante dos estuários portugueses. Disponível *online:*http://www.maretec.mohid.com/Estuarios/MenusEstuarios/Arade_Menu.htm

Penna, N., Capellacci, S., Ricci, F., (2004). The influence of the Po River discharge on phytoplankton bloom dynamics along the coastline of Pesaro (Italy) in the Adriatic Sea. *Marine Pollution Bulletin* 48, 321–6.

SNIRH, (2013). Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (1995-2013). Disponível *online:* http://snirh.pt/

Statham, P.J., (2012). Nutrients in estuaries - An overview and the potential impacts of climate change. *Science of the Total Environment* 434, 213–227.

Vollenweider, R.A., Giovanardi, F., Montanari, G., Rinaldi, A., (1998). Characterization of the Trophic Conditions of Marine Coastal Waters With Special Reference To the Nw Adriatic Sea : Proposal for a Trophic Scale , Turbidity and Generalized Water Quality Index. *Environmetrics* 9, 329–357.

Is there a seasonal fingerprint in the mass exchanges between the main inlet of Ria Formosa and the Atlantic ocean?

A. Rosa (1), A. Cravo (1) e J. Jacob (1)

(1) CIMA, FCT, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal, xana.imrosa@gmail.com.

Abstract: Ria Formosa, located in the south of Portugal, is a multi-inlet barrier island system under the influence of semidiurnal tides and it is constituted by 5 islands, 2 peninsulas and 6 inlets. Those are responsable for the exchange of water with the Atlantic ocean, controling the circulation inside the lagoonal ecosystem. The main objective of this work was to assess the seasonal variability on the dynamics of nutrients and suspended matter at the main inlet of this system - Faro-Olhão Inlet - concerning the mass exchanges with the coastal zone. Moreover, the influence of different forcing mechanisms, including the tides were assessed, determining in what extent these control the activity of phytoplankton within this system and in the adjacent ocean. To achieve the main goal, 7 campaigns were carried out in 2012 and 2013, taking into account contrasting tidal conditions. Data showed that the variability of mass exchanges through the Faro-Olhão is mainly explained by both the biological productivity of the waters and the physical processes acting in the adjacent coastal zone, that superimpose the tidal influence. The phytoplankton activity was higher during the spring and summer seasons, promoting an export of nutrients, chlorophyll *a* and suspended matter, able to fertilize the adjacent ocean. Upwelling events played a key role to the import of nutrients and chlorophyll *a* into the Ria Formosa, that would contribute to enhance its biological productivity.

Key words: coastal lagoons, Ria Formosa, Faro-Olhão inlet, mass transport.

1. INTRODUCTION

Coastal lagoons are productive and dynamic systems controlled by factors including wind, tides and spatio-temporal variability of natural processes (physical, chemical, biological and geological) occuring in these environments.

Ria Formosa is one of this kind of environments, recognized as the most important coastal ecosystem in the south coast of Portugal. It is relatively small, with a length of 55 km (E-W direction) and a maximum width of 6 km (N-S direction). The water column has an average depth of 3.5 meters and the flooded area can reach over 90 km^2. This shallow lagoon is formed by 5 islands, 2 peninsulas and 6 inlets. The inlets are interconnected with a complex network of channels, allowing the recirculation of water within the system and its exchange with the surrounding ocean. The **s**emi-diurnal tide is the dominant factor that controls the recirculation of water inside the lagoon, since this is responsable for ~50-75% of water exchange with the adjacent ocean in each tidal cycle (Newton & Mudge, 2003). This barrier islands system is characterized as marine, since the input of freshwater is insignificant (Newton & Mudge, 2003) and the annual rainfall is low (~500 $mm.year^{-1}$; Instituto de Meteorologia, 2010). Therefore, factors such as its narrowness, strong tidal currents and high rate of water exchanges makes this complex lagoonal system well mixed, with rare stratification, promoting a high dilution potential at Ria Formosa, particularly close to the inlets and in the main channels (Ferreira et al., 2003).

This work was carried out at the main inlet, Faro-Olhão, and the main goal was to evaluate the seasonal variability of the dynamics and of the exchanges of nutrients, chlorophyll *a* and suspended matter with the coastal zone, To accomplish this, the interplay of the driving forces acting on this boundary zone, including the tidal conditions, was analysed.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1 Field Site and Campaigns

This study is based on seven semi-diurnal tidal cycle oceanographic campaigns carried out in a cross-section of the Faro-Olhão inlet between 2012 and 2013, covering the various seasons of the year, three during Spring (SP1-ST, SP2-ST, SP2-NP), two in Autumn (A-NT and A-ST), one in Summer (S-ST) and one in Winter (W-ST), after a period of rainfall. A multi-parametric probe YSI (Model 6820) was used for *in situ* measurements of temperature, salinity, pH and dissolved oxygen (concentration and % saturation). Measurements and water samples collection (using a 5 L Niskin) for determination of nutrients, chlorophyll *a* and suspended solids were performed hourly along a complete tidal cycle (~12,5 h) at three points of the cross-section (Deserta margin, Farol margin and center of the inlet) and at three different depths: surface, Secchi

disk extinction depth and bottom. To study the mass exchanges, the flow velocity was measured with an ADP (ADP Bottom Track, Sontek).

2.2 Laboratory Analysis

The concentrations of nutrients (nitrate, nitrite, ammonium, phosphate and silicate) and chlorophyll *a* were determined based in spectrophotometric methods described in Grasshoff *et al.* (1983) and Lorenzen (1967), respectively. To determine the suspended solids concentrations, a gravimetric method was applied (APHA, 1992). To discriminate the organic from the inorganic fraction of the suspended solids, filters were burnt at 450 ° C during 4 h in order.

2.3 Calculation of Tidal Prisms and Mass Transport

The flow rate was obtained from the integration along the inlet cross-section of the product between the velocity (acquired by ADP) component normal to the cross section and the cross-sectional area. After that, the integration of the flow over the respective sampling period, provided the flood, ebb and residual tidal prisms. The transport of nutrients, chlorophyll *a* and suspended solids throughout the entire tidal cycle were estimated by time integrating along the tidal cycle the product between the average concentrations at the cross section and the flow rate. At last, the values of the net transport signal enabled to determine the behaviour of the Faro-Olhão inlet at each of the seven campaigns, providing information about the import (+) or export (-) of mass through it.

2.4 Meteorological and Oceanographic Conditions

To better understand the driving mechanisms responsible for the variability of the results, satellite imagery of sea surface temperature (SST) and chlorophyll *a* concentrations during and previously to the study periods were analysed, accessing the OceanColor WEB database (http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms/). The simultaneous observation of both type of images provides insights about the forcing of the coastal physical processes and its effect upon the phytoplankton activity.

2.5 Statistical Treatment

ANOVA tests with a confidence interval of 95% were performed, followed by post-hoc Tukey (comparing multiple independent samples; normal distribution data) and Kruskal-Wallis (non-normal data) to verify significant differences in the study variables between the three different stations along the section and the three depths along the water column. Principal component analysis (PCA) was accomplished in order to understand the relationships between the different environmental variables and identify which campaigns are associated with the discrimination of these parameters. This analysis was carried out using a version of StatSoft STATISTICA software.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Differences between Spring tide (ST) and Neap tide (NT) were noted, with greater amplitudes achieved during ST, when the flow range is maximum. However, the seasonal fingerprint and atmospheric and oceanographic processes were superimposed to the tidal signature having a greater contribution for the variability of the results. To understand the factors that best explain the variance of data for all the seven seasonal campaigns, a PCA was applied. The variables chosen for this analysis were temperature, salinity, oxygen saturation (%), nutrients, chlorophyll *a*, active chlorophyll *a* (%), SS (total and organic fraction). Fig. 1 (a) shows the association of the variables from the seven campaigns whereas the projection of the seasonal campaigns is shown in Fig1 (b).

This analysis shows that the two major components explain ~ 58% of the variance. PC1 accounts for 32% of the variance while PC2 for 26%. The major factor explaining the variance can be attributed to the seasonal cycle, as depicted by the inverse correlation between the oxygen saturation (%), organic fraction of SS and nutrients (Fig. 1a). The increase of biological activity had a major influence during Spring2-ST and Summer (Fig. 1b), caused by the consumption of nutrients by phytoplankton during photosynthesis, with an increase of production of dissolved oxygen. In Winter and Autumn-ST (Fig. 1b) the highest nutrients were observed accompanied by a decrease in % oxygen saturation, chlorophyll *a* and organic fraction of SS (Fig. 1a), since the phytoplankton activity was relatively low. It is also important to mention that in the Autumn – ST, an upwelling event provides nutrients to the coast and consequently into the Ria Formosa by tidal influence. The second factor is dominated by the atmospheric and oceanographic mechanisms as can be observed by the inverse correlation between temperature and salinity with nutrients and active chlorophyll *a* (Fig. 1a). In Summer and Autumn - NT campaign (Fig. 1b), the highest temperature and salinity occurred against the lowest concentration of nutrients and active chlorophyll *a*. In Spring2 – ST (Fig. 1b), the maximum active chlorophyll *a* was achieved when the temperature (and salinity) were lowest associated with the observed upwelling event.

The forcing mechanisms such as upwelling (in Autumn season) and the increase of phytoplankton activity in Spring and Summer seasons highly influenced the mass exchanges through the Faro-Olhão inlet (Table I).

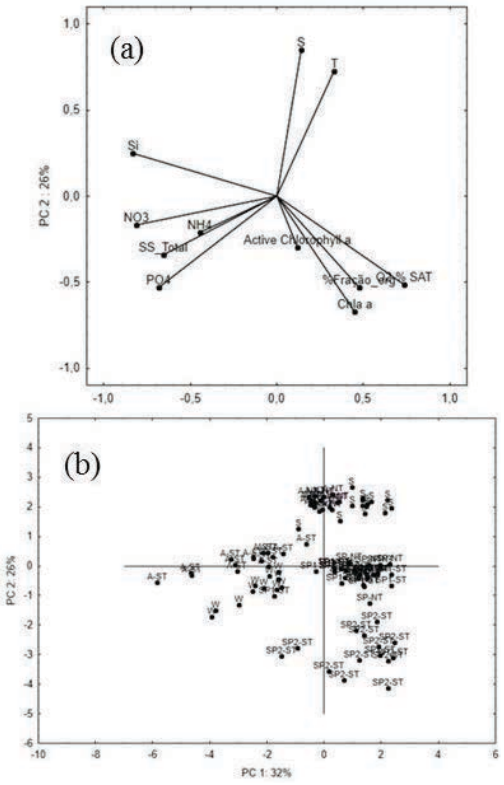


Fig. 1. PCA applied to the data (temperature, salinity, oxygen saturation (%), nutrients, chlorophyll a, active chlorophyll a (%), total SS and organic fraction) from the seven campaigns. (a) variables projection and (b) seasonal campaigns projection. SP1, SP2, S, A and W means the season and ST and NT the tidal phase.

Table I. Net tidal prisms and transport of nutrients, SS and Chl a during the complete tidal cycle in the 7 campaigns. Positive values refer to import into the Ria Formosa and negative values to export to the adjacent ocean.

Net Mass exchanges (kg)							
Campaign	Prism (m^3)	SiO_4	PO_4	NO_3	NH_4	Chl *a*	SS
Spring1 - ST	4.47E+06	170	-127	572	-555	26	-135 ton
Spring2 - ST	5.42E+05	-1050	7.7	-276	-203	25.8	-193 ton
Spring - NT	7.31E+06	294	126	-73.8	-15.6	12.8	28 ton
Summer - ST	7.93E+05	-1040	-306	-113	-380	-14.3	-110 ton
Autumn - NT	-3.11E+05	-68.1	21.7	43.5	-97.6	2.4	~ 4 ton
Autumn - ST	-1.45E+06	371	92.7	1290	-253	4.2	-210 ton
Winter - ST	-1.97E+05	-642	4.8	851	-158	-13.8	-252 ton

In Spring and Summer campaigns the inlet was flood dominated in terms of flow (import) whereas in Autumn and Winter campaigns its behaviour was opposite (export). This means that Faro-Olhão inlet in terms of flow is changeable and should not be defined as flood dominated (Pacheco *et al*., 2010). As expected, the flood and ebb prisms of the Neap tides campaigns were smaller than in Spring tides. Regardless the flood behaviour in Spring1, there was an import of chlorophyll *a* (26 kg), silicates (170 kg) and nitrates (~572 kg), possibly associated with previous upwelling events and the typical spring phytoplankton bloom (Fig. 2 (a)) while the export of phosphate (127 kg), SS (135 tons) and a maximum of ammonium (555 kg) show that within the Ria Formosa concentrations were higher than in the coast, and would fertilize it. In Spring2 - ST despite just chlorophyll *a* (~26 kg) and phosphate were imported (~8 kg) the rest of the nutrients were exported (silicate - 1 ton; nitrates - 276 kg and ammonium -203 kg) like SS (193 ton). Considering that 55% of the SS correspond to organic fraction, it is possible to estimate that ~ 100 tons of organic matter will enrich the adjacent ocean. These two first campaigns followed the seasonal pattern of increased phytoplankton activity during spring season (by availability of nutrients, temperature and solar radiation). In fact, in late April an upwelling event occurred (Fig. 2 (b)), and after wind relaxation the phytoplankton had time and stability in the water column to grow, reflected in chlorophyll *a* import in Spring2 – ST (Table I). In the following campaign the inlet continued to be flood dominated, with the highest net prism and in consequence, a general import of mass was registered, except for nitrates and ammonium (higher within the Ria Formosa). The chlorophyll *a* import was lower than in the previous campaign, reflecting its decrease within the Ria Formosa, by the decreased availability of nutrients due to their continuous consumption. In Summer, the inlet maintain the flood dominated behaviour but in opposition there was a global export of nutrients, chlorophyll *a* and SS, from which 26% corresponds to organic matter (~ 30 tons). This fact shows the increase of productivity of this system in Summer indicating that the Ria Formosa exports these compounds, fertilizing the adjacent coastal zone, regardless of the tidal prism. In Autumn - NP, the inlet reverses its behaviour and was ebb dominated but there was still an import of phosphates, nitrates, chlorophyll *a* and SS, due to their decrease in concentration in the Ria relatively to the coast. In the case of Autumn – ST, despite a low chlorophyll *a* import (~4 kg) estimate, an increase of nutrients import (~90 kg phosphates and > 1 ton nitrate) was evident, except for ammonium and SS. This campaign was conducted during an upwelling event, when there was a decrease of temperature (~5ºC), confirmed also by satellite images (Fig. 2 (c)) and supported by Jacob *et al*. (2014). This oceanographic process is frequent in the southern coast of Portugal, when favourable west component winds prevails (Relvas & Barton, 2002). After their occurrence, the nutrients and the chlorophyll *a* are supplied to the coast, and by tide transport will enter into the Ria Formosa. Considering that during the campaign and in previous days there was no wind relaxation, the phytoplankton was unable to develop and, in consequence, chlorophyll *a* import was low. Nevertheless, in the satellite image that overpass the period of observation, it is observed that the chlorophyll *a* in the coast increased after this event. The Winter campaign was conducted after a precipitation period and the inlet was ebb dominated in terms of flow. Chlorophyll *a*, ammonium, silicates and SS (maximum ~250 tons), mainly

inorganic (~ 82%) was exported. Still, there was an import of phosphates and nitrates from the coast, that like in the Autumn campaign, contribute to fertilize this ecosystem, impoverished in these compounds.

In conclusion, there was a clear seasonal fingerprint in the mass exchanges between the main inlet of Ria Formosa and the Atlantic Ocean. Regardless the signal of the tidal prism, the Faro-Olhão inlet behaved as a source of material able to increase the biological productivity of the coastal zone during Spring and Summer, with Spring2 – ST campaign showing the highest phytoplankton activity (expressed by the chlorophyll *a*).

The nutrients mostly exported were ammonium and nitrates, that were present in larger concentrations inside the lagoon than in the adjacent coast. In Autumn and Winter, if there are no external sources to supply nutrients to the Ria Formosa, their concentration tends to decrease within the lagoon due to a continuous consumption of nutrients by the phytoplankton. This fact led to an import of phosphates and nitrates from the coast, magnified in periods of upwelling events. So, the upwelling event felt in the Autumn - ST played a key role as a driving mechanism to supply nutrients into the Ria Formosa contributing to increase its biological productivity by that time.

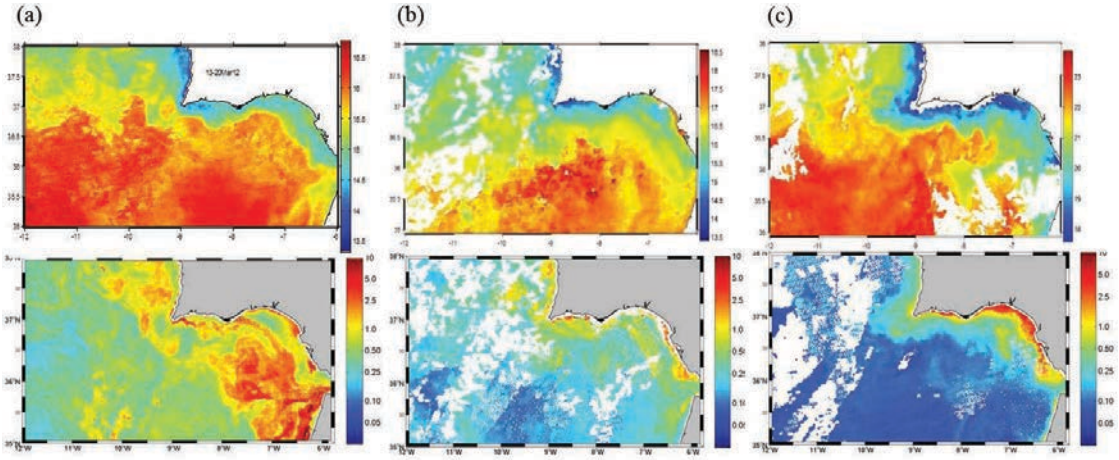


Fig. 2. Satellite images of weekly averaged Sea Surface Temperature (in the first row) and chlorophyll a concentrations (in the second row) in the south coast of Portugal. (a) 13th-20th March 2012, (b) 30th-7th May 2012 and (c) 15th-22nd of October 2012.

Acknowledgments

The authors would like to thank to all the team members for their support in the course of the campaigns, to Catarina Pereira for the chemical analyses and Lilian Krug for the provided weekly chlorophyll *a* satellite images (Modis Aqua), from the PhytoClima Project (PTDC/AAC-CLI/114512/2009). This work was financially supported by Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT) under the project: "PTDC/MAR/114217/2009-COALA".

REFERENCES

A.P.H.A. (1992). WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. A. E Greenberg; L. S. Clesceri and A. D. Eaton (eds.), Maryland, U.S.A.

Ferreira, J.G, Simas, S.T., Nobre, A., Silva, M.C., Schifferegger K., Lencart-Silva, J., 2003. Identification of sensitive areas and vulnerable zones in transitional and coastal Portuguese systems.

Grasshoff, K., Erkhardt, M. and Kremling, K. (1983). Methods of Seawater Analysis. Verlag Chemie, New York, 419 pp.

Instituto de Meteorologia. (2010). Boletim Climatológico Anual. http://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20110204/PdTzSQuJAvrrwvtcdtee/cli_20100101_20101231_pcl_aa_co_pt.pdf.

Jacob, J., Simões, N., Cravo, A. (2014). Influência e propagação no interior da Ria Formosa dos processos oceanográficos de mesoescala na costa sul de Portugal. 3ªs Jornadas da Engenharia Hidrográfica, Lisboa, 24-26 de Junho, 171-174.

Lorenzen Carl J. (1967). Vertical distribution of chlorophyll and phaeo-pigments: Baja California. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 14 (6): 735- 745.

Newton, A., & Mudge, S. M. (2003). Temperature and salinity regimes in a shallow, mesotidal lagoon, the Ria Formosa, Portugal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57(1-2), 73–85.

Pacheco, A., Ferreira, Ó., Williams, J. J., Garel, E., Vila-Concejo, A., & Dias, J. A. (2010). Hydrodynamics and equilibrium of a multiple-inlet system. *Marine Geology*, 274(1-4), 32–42.

Relvas, P., Barton, E.D., 2002. Mesoescale patterns in the Cape São Vicente (Iberian Peninsula) upwelling region. J. Geophys. Res. 107 (C10), 3164 (28 (1 23)).

Role of the Faro-Olhão inlet and adjacent channels on the mass exchanges with the coastal zone – effect of the driving mechanisms in Autumn 2012

A. Cravo (1), A. Ovelheiro (1) and J. Jacob (1)

(1) CIMA – FCT, University of Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro; acravo@ualg.pt.

Abstract: Ria Formosa, a coastal lagoon in the south of Portugal, presents a high daily water renewal due to its six inlets. From those, the Faro-Olhão inlet is the most important in terms of mass exchanges between this ecosystem and the adjacent ocean. To estimate the contribution of this inlet and the adjacent channels (Faro and Olhão channels), nutrients, chlorophyll *a* (as a proxy of phytoplankton) and particulate matter (organic and inorganic) were measured in Autumn 2012. Samples were taken hourly during two complete neap and spring semi-diurnal tidal cycles, along with the measurement of the current velocity across the inlet and channels sections. The results contributed to: a) characterize the dynamics of these compounds in Autumn conditions, b) understand the role of the driving mechanisms responsible for the exchanges between this ecosystem and the coastal zone and c) evaluate its impact upon the phytoplankton activity.

Key words: Coastal lagoons, Ria Formosa, mass budgets, nutrients, particulate matter.

1. INTRODUCTION

The Ria Formosa coastal lagoon (on the south coast of Portugal - Fig. 1) is typically shallow (average depth <2 m) and occupy an area of ~100 km^2. It has six permanent connections to the ocean which are responsible for a great daily water renewal. This is a meso-tidal system (mean tidal amplitude ~2 m, range: 1.5-3.5 m) with semidiurnal tides. Thermal and haline vertical stratification does not occur due to reduced freshwater inputs (except at Tavira – Gilão river). The western sector is the most important, where the Faro-Olhão, Armona and Ancão inlets exchange semidiurnally ~90% of total water volume. From those three inlets, the Faro-Olhão (BFO) is the most important in terms of water exchanges with the adjacent ocean (Pacheco *et al.*, 2010, Jacob *et al.*, 2013): ~60% in spring tides and ~45% in neap tides, and in this case sharing a similar proportion with the Armona inlet (~40%; Pacheco *et al.*, 2010, Jacob *et al.*, 2013). However, information about its chemical role and the exchange budgets along complete tidal cycles are scarce.

The main goal of this study was: a) to estimate the net budgets of nutrients, suspended solids (SS) and chlorophyll a (chl *a*) (as a proxy of phytoplankton) through the BFO and the adjacent channels, Faro (CF) and Olhão (CF), in opposite fortnightly tide phases (Spring and Neap tides), in the Autumn of 2012; b) to understand the role of the driving mechanisms responsible for the variability observed and c) to evaluate the impact of the exchanges through this inlet upon the phytoplankton activity.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Field site and campaigns

In the Autumn of 2012 conditions, two campaigns were carried out at BFO and the adjacent channels (CF and CO) over complete semi-diurnal tidal cycles in neap (NT) and spring tide (ST).

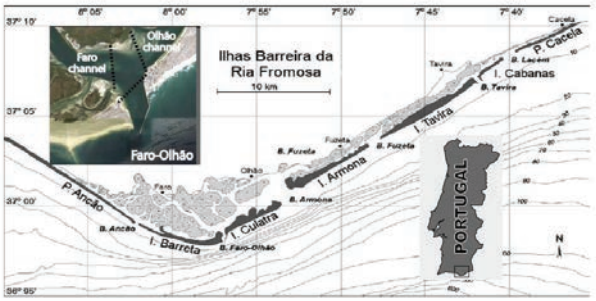


Fig. 1. Sampling sites location (adapted from: Vila-Concejo et al., 2004 and Pacheco et al., 2010).

The fieldwork included current velocity measured hourly along a cross-section of the inlet (Fig. 1), simultaneously with *in situ* physical and chemical measurements and water sampling at three depths (surface, Secchi disk extinction depth and bottom) at a central point representative of the cross-section, during the entire tidal cycle (~12.5 h). It was confirmed previously that there were no significant horizontal differences (p>0.05) along the section regarding the physical and chemical parameters analysed. Contemporarily, at the CF and CO (Fig. 1) a similar sampling strategy was carried out but, as the depth of the water column was < 10 m, water sampling measurements were conducted just at surface and bottom levels.

The flow velocity was measured using an ADP (Sontek). At the inlet and channels, water samples for nutrients, SS and chl *a* concentrations were collected with a 5 L Niskin bottle. Temperature (T), salinity (S), pH, dissolved oxygen (DO in concentration and in % saturation) were measured *in situ* using a YSI 6820 multi-parametric probe, at the same levels where water samples were taken.

2.2. Methods

Water samples (1 L) for the analysis of nutrients (ammonium, nitrite, nitrate, phosphate and silicate) were filtered through 0.45 µm fiber glass filters (for SS determination), decontaminated, precombusted and weighed. After filtration, filters were frozen at –20°C. Water samples (1 L) for chl *a* concentrations were filtered using GF/F glass fibre filters and then deep-frozen at -20 °C until further analysis. For the determination of nutrients and chl *a* spectrophotometric methods were applied as described in Grasshoff *et al.* (1983) and Lorenzen (1967), respectively. For SS determination a gravimetric method was applied as described by APHA (1992). To distinguish both organic and inorganic fraction of particulate matter, filters were combusted during 4 h at 450 °C.

The discharge was calculated by integrating the velocity component normal to the cross-section over the cross-sectional area.

The numerical integration in the time domain of the hourly discharge values along the flood and ebb periods provided the flood and ebb tidal prisms, respectively. The residual tidal prism or net transport of water was obtained as the difference between the flood and ebb tidal prisms or, equivalently, through the numerical integration of the discharge over the complete semi-diurnal tidal cycle.

The transport of nutrients, SS and chl *a* was calculated hourly over the entire tidal cycle multiplying the discharge (Q) by the cross-sectional average concentration. Finally, the net transport of nutrients, SS and chl *a* was obtained by integrating in the time domain the hourly transport values over the entire tidal cycle.

2.3. Statistical Treatment

Since data were not normally distributed, non-parametric tests were applied to determine if there were significant differences between the levels selected along the water column, between sites and tidal conditions. The minimum level of confidence considered was 95 %.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Statistics reveal that at the three sampling sites (BFO, CF and CO) there was no stratification along the water column (p>0.05) for any of the parameters measured. These data confirm that the water column is well mixed, as recently reported by Cravo *et al.*, (2014) or previously by other authors (Falcão and Vale, 2003; Cardoso *et al.*, 2005; Newton and Mudge, 2003; Barbosa, 2010). The mean values representative for the water column were used for comparisons between sites and tidal conditions, to calculate the mean mass transport along the tidal cycles and the net transports.

The phases of the semi-diurnal and fortnightly tide components were key drivers to explain the variability of the water fluxes along the tidal cycle. A semi-diurnal tidal variation was depicted for the studied parameters in both spring and neap tides cycles, more evident during ST, when greater volumes were exchanged. Considering both tidal components, globally, it was observed that temperature, dissolved oxygen (concentration and % saturation) was higher at NT while the nutrients and SS were higher during ST (p<0.05). Nevertheless, between sampling surveys, chemical data variability reveals that the dynamics of the parameters through the inlet and channels depends not only on tidal influence and characteristics of the boundary waters mixing, but also on the intensity of other driving mechanisms like the atmospheric and oceanic processes acting on the adjacent coastal zone.

Upwelling occurred during the ST survey, confirmed by the marked decrease of the water temperature in the SST satellite imagery (Fig. 2A) and clearly influenced the analysed parameters. Relatively to NT, during ST it was not just temperature that decreased from 22.3 °C to 15.6 ºC but also salinity from 36.8 to 36.2, pH from 8.2 to 8.0 and dissolved oxygen saturation from 125% to 89%. In contrast, the nutrients showed an evident increase (ammonium: up to 3.5 µM, nitrates: up to 6.9 µM, phosphates: up to 0.6 µM, silicates: up to 5.0 µM), as well as SS (up to 14.2 mg/L). From those, regarding their nature, in both campaigns the inorganic fraction was dominant (~80%) with the organic fraction representing a mean of ~ 20%. During this upwelling period in ST, no wind relaxation occurred. In consequence, the phytoplankton development, expressed by the chl *a* was not evident (< 0.6 µg/L) in comparison with NT. However, the chlorophyll *a* satellite image, a composite of 8 days (from 15 to 22/10, extending beyond the day of the campaign, 16/10), shows that in the following days phytoplankton grew on the coast, increasing the chl *a* concentration (Fig. 2B).

In the south coast upwelling is a recurrent process, and the west favourable component of the wind stress is the key driving mechanism. It is known that this coastal process is frequent in this region between May and October (Relvas and Barton, 2002). Its extent depends on the intensity and duration of the westerlies, and may ŏverpass the coastal area between the Cape São Vicente and the Cape Santa Maria (García-Lafuente *et* al., 2006),

reaching the Guadiana river coastal zone in the eastern border of Portugal (Cardeira et al., 2013).

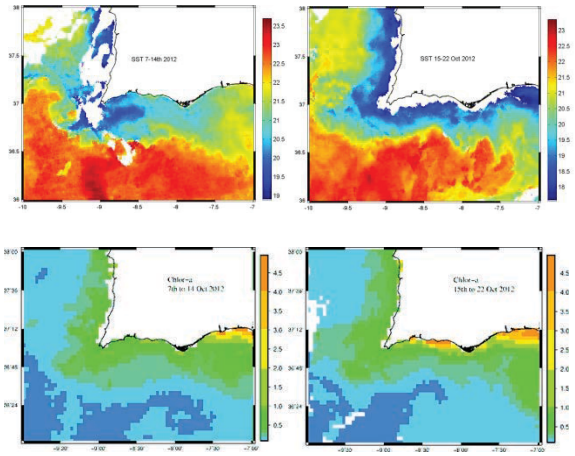


Fig. 2. Eight-days composite of: A) Sea Surface Temperature (SST) and B) chlorophyll a (Chlor-a) satellite images bounded by the area 36° – 38°N, 7° – 10°W, for a period prior to and including the four campaigns: 7-14 October 2012 and 15-22 October 2012. Source: OceanColor, NASA.

Spatially, data analysis also showed a different behaviour of the chemical compounds among sites. BFO had, generally, the lowest nutrients concentration and the lowest variability while CO had the highest nutrients concentration, N:Si ratio and chl *a* (p<0.05). CF had higher salinity and silicate values than BFO (p<0.05), although not different from CO (p>0.05). These differences, particularly at CO, may be due to the water circulation inside the lagoon or may be associated to other sources of nutrients, such as remineralization in secondary channels and saltmarshes or anthropogenic sources (*e.g.* some influence from agricultural runoff and/or from sewage discharges).

Regarding the mass balances (Tab. I), the coastal upwelling during ST left an evident signature on the exchanges of nutrients, chl *a* and SS between the main inlet of Ria Formosa (and channels) and the coastal ocean, beyond the semi-diurnal and the fortnightly tide effect, as already observed during other surveys in this system (Alcântara *et al.*, 2012; Cravo *et al.*, 2014).

Table I shows that the magnitude of the mass exchanges during the flood and/or ebb could attain 1 to 2 orders of magnitude above the net transport estimated. Between surveys, the exchanges of water, nutrients, SS and chl *a* in ST were higher than in NT. During these two tidal campaigns BFO was ebb dominant in terms of flow, while CF and CO showed an opposite behaviour between surveys. That fact confirms the intimate connection between the channels and the other inlets of the western sector – Ancão and Armona Inlets. The application of a numerical hydrodynamic model to the western sector of Ria Formosa, showed that CO also receives an important contribution and influence from the Armona inlet while CF is greatly influenced by the Ancão Inlet (Fabião *et al.*, 2016). Moreover, the water volumes exchanged through BFO were greater than the sum of the volumes through the two adjacent channels. From Table I, it can be calculated that the contribution of CF corresponds to 56-62% of the volume exchanged through BFO, more than the double of that correspondent to CO, varying from 18 to 26%. Comparing the volumes of water exchanged through the inlet with the sum of the ebb or flood prisms of both channels, there is about 20% of the total volume flooding to or ebbing from these channels that is lost in the calculation of their contribution. This may be attributed to the fact that the CO channel is not as well defined as CF channel, it is located on a shallow area where there is a relative high amount of water spread on the saltmarshes that was not surveyed and, consequently, not included in the budgets calculations.

Table I. Flood, ebb and net tidal prisms (m^3) and transport (kg) of chlorophyll a (chl a), silicate (SiO_4-Si), Phosphate (PO_4-P), nitrate (NO_3-N), ammonium (NH_4-N), and suspended solids (SS) at BFO, CF and CO during the Autumn 2012 surveys in Neap and Spring tide conditions.

Campaign	Site	tidal condition	Flow	Chl a	SiO4	PO4	NO3	NH4	SS
			m^3	Transport (kg)					
9Oct12-NT	BFO	Flood	3.05E+07	6.53E+00	2.32E+03	1.65E+02	3.72E+02	2.81E+02	9.48E+04
		Ebb	-3.08E+07	-4.13E+00	-2.39E+03	-1.43E+02	-3.28E+02	-3.79E+02	-9.10E+04
		Net	**-3.11E+05**	**2.40E+00**	**-6.81E+01**	**2.17E+01**	**4.35E+01**	**-9.76E+01**	**3.79E+03**
	CF	Flood	1.70E+07	8.53E+00	1.55E+03	5.87E+01	1.40E+02	1.86E+02	5.91E+04
		Ebb	-1.90E+07	-8.58E+00	-1.90E+03	-6.76E+01	-7.97E+01	-2.52E+02	-8.68E+04
		Net	**-1.99E+06**	**-4.52E-02**	**-3.50E+02**	**-8.91E+00**	**6.00E+01**	**-6.56E+01**	**-2.77E+04**
	CO	Flood	7.81E+06	2.30E+00	7.30E+02	3.05E+01	8.13E+01	1.68E+02	3.00E+04
		Ebb	-5.45E+06	-2.07E+00	-5.28E+02	-3.25E+01	-8.89E+01	-1.30E+02	-3.37E+04
		Net	**2.36E+06**	**2.27E-01**	**2.02E+02**	**-1.91E+00**	**-7.65E+00**	**3.81E+01**	**-3.73E+03**
16Oct12-ST	BFO	Flood	8.41E+07	2.32E+01	9.21E+03	8.10E+02	6.13E+03	5.07E+02	3.31E+05
		Ebb	-8.56E+07	-1.91E+01	-8.84E+03	-7.18E+02	-4.84E+03	-7.61E+02	-5.41E+05
		Net	**-1.45E+06**	**4.16E+00**	**3.71E+02**	**9.27E+01**	**1.29E+03**	**-2.53E+02**	**-2.10E+05**
	CF	Flood	5.32E+07	1.55E+01	5.85E+03	4.43E+02	3.80E+03	3.75E+02	2.09E+05
		Ebb	-4.76E+07	-1.14E+01	-5.27E+03	-3.46E+02	-3.16E+03	-3.78E+02	-2.65E+05
		Net	**5.63E+06**	**4.10E+00**	**5.78E+02**	**9.66E+01**	**6.44E+02**	**-2.73E+00**	**-5.58E+04**
	CO	Flood	1.61E+07	6.40E+00	1.94E+03	1.75E+02	1.29E+03	2.51E+02	7.48E+04
		Ebb	-1.74E+07	-5.97E+00	-1.95E+03	-2.00E+02	-1.12E+03	-3.68E+02	-8.97E+04
		Net	**-1.34E+06**	**4.29E-01**	**-1.25E+01**	**-2.49E+01**	**1.72E+02**	**-1.17E+02**	**-1.49E+04**

Regardless the ebb behaviour of BFO in terms of flow, chlorophyll *a* was more imported in ST, changing from 2 to 4 kg, like nitrate that markedly increased from 43 kg to 1290 kg of N and phosphate from 22 to 93 kg of P. Ammonium was consistently exported through BFO increasing from 98 kg (NT) to 253 kg (ST). Silicate and SS behaviour varied between both campaigns. Silicate was exported in NT (68 kg) and imported in ST (371 kg Si), while SS were imported in NT (4 tons) and highly exported in ST (210 tons). These data show that during both campaigns an important export from the Ria Formosa occurred for ammonium, like for suspended solids during ST that contributed to fertilize the adjacent coast. As ~20% of the total solids were organic it means that the Ria Formosa supplied to the coastal zone ~40 tons of organic matter that after remineralization will fertilize this area. Additionally, these data also show that after upwelling events the coastal waters fertilise the Ria Formosa lagoon, by importing nutrients (nitrate, phosphate and silicate) and phytoplankton, further contributing to increase its biological productivity.

In fact, differences were found between these campaigns and other two conducted in the Autumn of 2011 (Cravo *et al.*, 2012), when no direct influence of upwelling was registered.

4. CONCLUSIONS

- Greater amplitude of data was recorded particularly during more energetic conditions in ST.

- Water volumes exchanged through BFO were greater than the sum of both channels, with a higher contribution from CF than from CO.

- The pattern of variability of hydrographical properties at BFO inlet and adjacent channels changed along time reliant on the hydrodynamics and circulation between the other main inlets.

- Results illustrate the strong interconnectivity and interplay between the Ria Formosa and the coastal zone, not only dependent on tides but also on the physical forcings, such as the upwelling.

- Tide effects coupled with important upwelling events, can contribute to further fertilize the Ria Formosa system, increasing its biological productivity.

Acknowledgements

The authors would like to thank all the collaborators that participated in the field campaigns and Catarina Pereira that analysed the samples for chlorophyll *a*, suspended solids and nutrients determination.

REFERENCES

Alcântara, P., Cravo A. and Jacob, J. (2012). Variability of nutrients and chlorophyll *a* in Ancão inlet during a spring tidal cycle in April 2009, *Ciencias Marinas*, 30 (1B), 161-176.

American Public Health Association (A.P.H.A.) (1992) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Maryland, U.S.A.

Barbosa, A.B. (2010). Seasonal and interannual variability of planktonic microbes in a mesotidal coastal lagoon (Ria Formosa, SE Portugal): impact of climatic changes and local-human influences. In: H. Paerl and M. Kennish (eds). *Coastal Lagoons: critical habitats of environmental:change*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 335-366.

Cardeira, S., Rita, F., Relvas, P., and Cravo, A. (2013). Chlorophyll *a* and chemical signatures during an upwelling event off the South Portuguese Coast (SW Iberia). *Continental Shelf Research*, 52: 133–149.

Cardoso, A., Santos, A. and Cruz, I. (2005). A Ria Formosa – uma visão global da química das águas e sedimentos. *ANAIS do Instituto Hidrográfico*, 17, 7-12.

Cravo, A., Jacob, J., Cardeira, S., Rosa, M., Madureira, M., Rita, and F., Luís, J. (2012). Mass Exchanges Between the Ria Formosa Lagoon and the Adjacent Ocean Through the Faro-Olhão Inlet During a Neap Tide in Autumn Conditions. Instituto Hidrográfico, *2ªs Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, 257-260.

Cravo, A., Cardeira, S., Pereira, C., Rosa, M., Alcântara, P., Madureira, M., Rita, F., Luis, J., and Jacob, J. (2014). Exchanges of nutrients and chlorophyll a through two inlets of Ria Formosa, South of Portugal, during coastal upwelling events. *Journal of Sea Research*, 93, 63-74.

Fabião, J., Rodrigues, M., Fortunato, A.B., Jacob, J.,and Cravo, A. (2016). Water exchanges between a multi-inlet lagoon and the ocean: the role of forcing mechanisms. *Ocean Dynamics*, 66 (2), 173-194.

Falcão, M and Vale, C. (2003). Nutrient dynamics in a coastal lagoon (Ria Formosa, Portugal): the importance of lagoon-sea water exchanges on the biological productivity. *Ciencias Marinas*, 29, 425–433.

García-Lafuente, J., Delgado, J., Criado-Aldeanueva F., Bruno, M., Rio, J., and Vargas, J.M. (2006). Water mass circulation on the continental shelf of the Gulf of Cádiz. *Deep-Sea Research II*, 53, 1182–1197.

Grasshoff K, Erkhardt M and Kremling K. (1983). *Methods of Seawater Analysis*. Verlag Chemie, New York, 419 pp.

Jacob J., Cardeira S., Rodrigues M., Bruneau N., Azevedo A., Fortunato A.B., Rosa M., and Cravo A. (2013). Experimental and numerical study of the hydrodynamics of the western sector of Ria Formosa. *Journal of Coastal Research*, SI65, 2011-2016.

Lorenzen, C.J. (1967). Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography*, 12, 343-346.

Newton, A. and Mudge, S.M. (2003). Temperature and salinity regimes in a shallow, mesotidal lagoon, the Ria Formosa.Portugal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57, 73-85.

Pacheco, A., Ferreira, Ó., Williams, J.J., Garel, E., Vila-Concejo, A. and Dias, J.A. (2010). Hydrodynamics and equilibrium of a multiple-inlet system. *Marine Geology*, 274, 32–42.

Relvas, P., and Barton, E.D. (2002). Mesoescale patterns in the Cape São Vicente (Iberian Peninsula) upwelling region. *Journal of Geophysical Research*, 107, 3164, 28 (1-23).

Vila-Concejo A., Ferreira Ó., Morris B.D., Matias A., and Dias J.M.A. (2004) Lessons from inlet relocation: exemples from Southern Portugal. *Coastal Enginnering*, 51, 967-990.

Aplicação de cartas de controlo na monitorização de resultados de ensaios de comparação interlaboratorial

D. Carinhas (1), C. Borges (1) e P. Infante (2)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº49, 1249-093 Lisboa; dora.carinhas@hidrografico.pt

(2) CIMA-UE e ECT, Universidade de Évora.

Resumo: A norma NP EN ISO/IEC 17025 descreve os requisitos gerais para o reconhecimento da competência de um laboratório em realizar ensaios e/ou calibrações, incluindo amostragem, que é utilizada pelos laboratórios para desenvolver os seus sistemas de gestão da qualidade e para as atividades administrativas e técnicas. Além da referência aos procedimentos de controlo da qualidade para monitorizar a validade dos ensaios e calibrações realizadas, é referida a necessidade dos laboratórios participarem em Ensaios de Comparação Interlaboratorial (ECI) como garantia da fiabilidade dos resultados. Neste trabalho, apresentam-se resultados da aplicação de cartas de controlo de qualidade para monitorização da estatística z-score (diferença entre o resultado obtido pelo laboratório participante e o valor de referência dividida pelo erro). Quando os dados analisados apresentam autocorrelação, é testado um modelo apropriado de série temporal, ou seja, um modelo que remova a autocorrelação dos dados aplicando cartas de controlo aos resíduos.

Palavras-chave: Cartas de controlo, controlo estatístico do processo, ensaios de comparação interlaboratoriais.

1. INTRODUÇÃO

As cartas de controlo são uma importante ferramenta da qualidade, que permite distinguir entre a variação inerente ao processo e a variação resultante de causas especiais, constituindo uma representação gráfica da estabilidade ou instabilidade de um processo ao longo do tempo (Gomes *et al.*, 2010). Estas ferramentas estatísticas são habitualmente planeadas e avaliadas assumindo que as observações do processo são independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.), hipótese que é frequentemente violada na prática, pois em muitos processos as observações são correlacionadas.

Uma estratégia frequentemente utilizada, sugerida por Reynolds e Lu (1997), consiste em ajustar as observações da característica de qualidade a um modelo de previsão apropriado e monitorizar o processo com cartas de controlo para os resíduos independentes e identicamente distribuídos (i.i.d.) resultantes.

Embora a carta de valores individuais, conhecida por carta X, seja mais frequente quando trabalhamos com observações individuais, Montgomery (2009) recomenda a carta de médias móveis exponencialmente ponderadas (carta EWMA) para medições individuais, em particular na fase de monitorização quando se pretendem detetar pequenas alterações do processo, independentemente da distribuição das observações.

2. METODOLOGIA

As cartas EWMA surgiram mais recentemente na literatura de modo a colmatar algumas das deficiências das tradicionais cartas de Shewhart, no que diz respeito, por exemplo, à pouca eficácia para detetar pequenas alterações nos parâmetros do processo e à falta de robustez relativamente às hipóteses subjacentes à sua implementação, nomeadamente a independência e normalidade dos dados (Gomes et al., 2010). As cartas de Shewhart tomam em conta apenas a última informação que recebem sobre os processos, e como tal perdem sensibilidade a pequenas alterações no parâmetro do processo.

A carta EWMA é essencialmente devida a Roberts (1959) e a Hunter (1986). A estatística criada pela carta EWMA é exponencialmente amortecida dando ponderações diferentes a cada observação anterior da mesma estatística.

Define-se uma estatística E que irá controlar pequenas alterações na média do processo. A expressão da variável E, para um instante t, é a descrita pela equação:

$$E_t = (1-\lambda)E_{t-1} + \lambda Y_t, \quad t = 1, 2, \ldots \qquad (1)$$

onde, E_t - Valor da estatística E no instante t; λ– Constante de amortecimento; Y_t – Valor observado da característica em estudo no instante t.

Os limites da carta de controlo EWMA são dados em função da constante de amortecimento, do valor do ARL0 (isto é, o número médio de amostras que é necessário analisar até haver indicação do processo estar fora de controlo) desejado e da variância da característica em estudo. Os valores dos limites de controlo e da linha central destas cartas são obtidos pelas expressões,

$$LSC_E = E_0 + k\sigma_E \quad (2)$$

$$LIC_E = E_0 - k\sigma_E \quad (3)$$

$$LC_E = E_0 \quad (4)$$

onde, E_0 – Valor inicial da estatística E, igual à média do processo; k – Valor do nível de controlo, para um determinado ARL0 e λ; σ_E – Desvio padrão da estatística E dada pela expressão.

$$\sigma_E{}^2 = \sigma_Y{}^2 \left(\frac{\lambda}{2-\lambda}\right)(1-(1-\lambda)^{2t}) \quad (5)$$

Para determinar os valores da constante de amortecimento e do nível de controlo, o primeiro passo necessário será definir um valor para o ARL0 que se considere aceitável, e a alteração da média que se deseje detetar. A partir desses valores, e dos ábacos da carta EWMA podem ser retirados os valores de k e de λ a considerar.

Nas cartas EWMA, considera-se que um processo está sob controlo estatístico caso não hajam pontos fora dos limites de controlo.

Na presença de dados onde se verifique a existência de autocorrelação significativa, a utilização das técnicas anteriormente referidas só ocorre para os resíduos ou erros de previsão das séries de dados, desde que os mesmos não apresentem correlação significativa, ou seja, possam ser considerados ruído branco (Pereira & Requeijo, 2012).

Desta forma é possível aplicar a estatística E da carta de controlo EWMA à série dos resíduos, sendo válidas as expressões, com a ressalva que o desvio padrão do processo deve ser substituído pelo desvio padrão dos resíduos ou do erro de previsão, a média do processo deve ser substituída por zero, que é o valor esperado dos resíduos ou erros de previsão.

A Figura 1 apresenta o fluxograma para a aplicação das cartas de controlo.

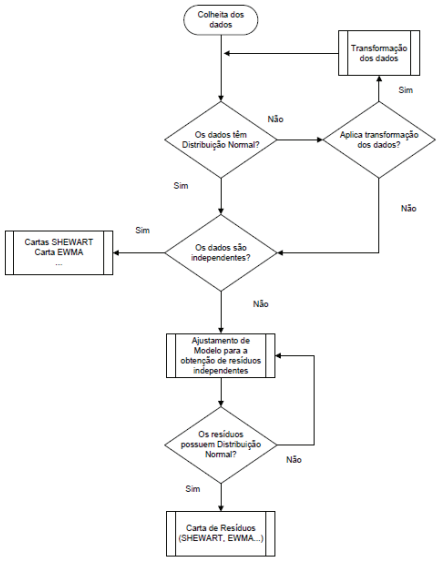


Fig. 1. Sugestão de fluxograma para aplicação de cartas de controlo.

3. RESULTADOS

Para se perceber a importância de se poder assumir a independência entre as observações, considere-se como exemplo a participação do Instituto Hidrográfico em Ensaios de Comparação Interlaboratorial (ECI), organizados pelo programa Quasimeme, entre abril de 2004 e abril de 2013, nomeadamente para a determinação do nutriente nitrito em águas salinas. Neste caso é monitorizada a estatística z-score (Figura 2).

O valor z-score tem a seguinte classificação: |z|<2 satisfatório, 2<|z|<3 questionável, |z|>3 insatisfatório (Wells e Cofino, 1993).

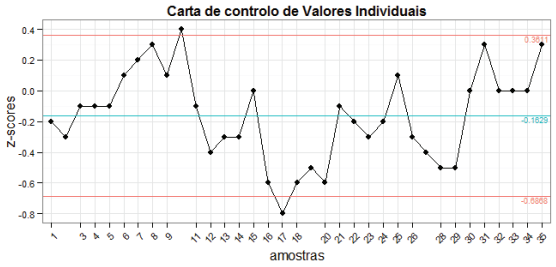


Fig. 2. Carta Shewhart de valores individuais aplicada aos z-scores.

A carta de valores individuais traduz um processo com apenas dois pontos fora de controlo estatísticos. Como todos os valores se encontram dentro das especificações (z-score entre -2 e 2) não são eliminados os dois pontos acima referenciados.

Para comparar o comportamento das cartas de controlo, aplicou-se, aos mesmos dados, a carta EWMA (Figura 3).

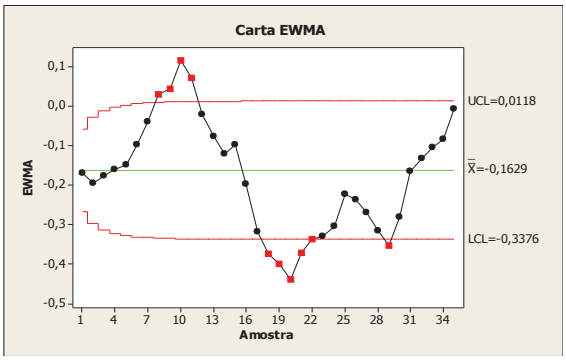


Fig. 3. Carta EWMA aplicada aos z-scores.

Verifica-se que surgem algumas observações acima do limite superior de controlo indiciando um aumento da média dos z-scores e mais tarde algumas observações abaixo do limite superior de controlo indiciando uma diminuição da média dos z-scores. Portanto, a Figura 3 é reveladora de um processo fora de controlo estatístico.

Uma das hipóteses de utilização das cartas de controlo ainda não foi testada: a existência de correlação entre os dados.

A hipótese de correlação dos dados foi testada através dos gráficos de autocorrelação e autocorrelação parcial (ACF e PACF, respetivamente).

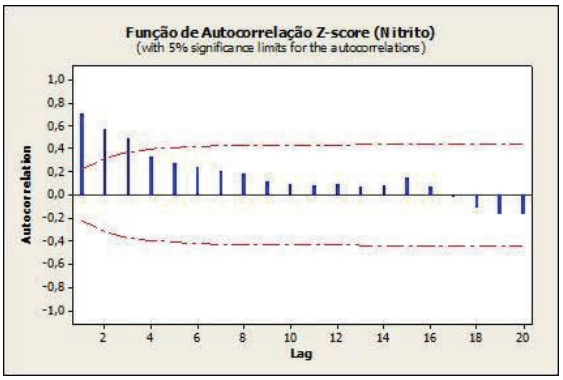


Fig. 4. Gráfico ACF.

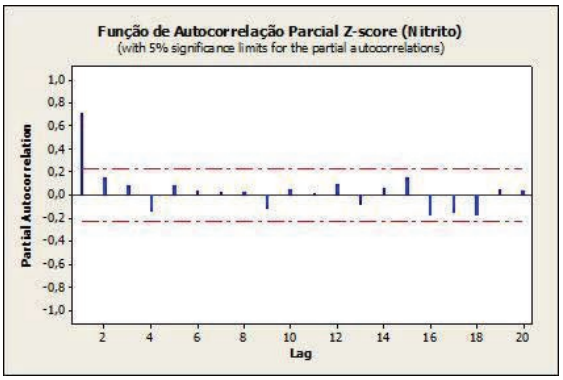


Fig. 5. Gráfico PACF.

Pelos gráficos anteriores podemos observar que vários "lags" ultrapassam os limites de controlo. Verificou-se que a hipótese de independência das observações dos z-scores não era válida, pelo que se procedeu à obtenção do modelo que se mostrou mais adequado, neste caso particular, o modelo ARIMA (1, 1, 1). Em seguida aplicou-se a carta EWMA aos resíduos com o objetivo de verificar se o processo estava, ou não, sob controlo estatístico (Figura 6).

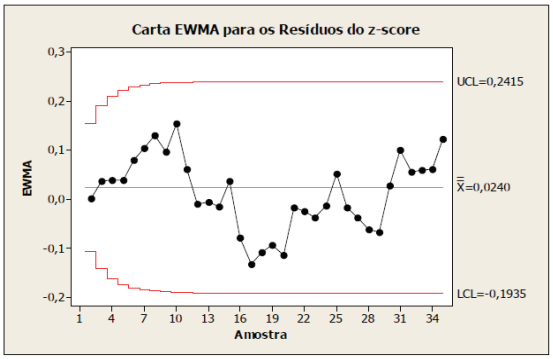


Fig. 6. Carta EWMA aplicado aos resíduos do modelo: $X_t - 0{,}6211X_{t-1} = -0{,}9554e_{t-1}$.

Pode ser observado, na Figura 6, que todos os pontos encontram-se dentro dos limites de controlo o que traduz um processo sob controlo estatístico com média muito perto do valor alvo (igual a zero) para a estatística z-score.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados alguns resultados de um estudo de implementação de algumas ferramentas de controlo de qualidade, nomeadamente cartas de controlo, nos resultados de ensaios de comparação interlaboratorial na determinação de nitrito em águas salinas.

Foi possível a construção de cartas de controlo para verificar a aplicabilidade em ensaios laboratoriais. A carta EWMA apontou para um processo fora de controlo estatístico constatando-se que possui um bom desempenho da deteção de instabilidades em processos com pequenos desvios de serem apontados pelas cartas tradicionalmente utilizadas como é o caso das cartas Shewhart.

Verificaram-se as hipóteses de independência da variável z-score, procedeu-se à estimação do modelo ARIMA (1,1,1), aplicando-se posteriormente a carta EWMA para os resíduos dos z-scores e verificou-se que o processo está sob controlo estatístico.

As cartas de controlo apresentadas permitem uma monitorização da estatística z-score, identificar possíveis tendências no processo e em caso positivo implementar ações de melhoria.

Para a monitorização de resultados de ensaios de comparação interlaboratoriais recomenda-se a aplicação das cartas EWMA aos resíduos do modelo por não se verificar a independência dos dados individuais.

Em muitas aplicações do controlo estatístico do processo as soluções para as questões de autocorrelação não são fáceis de encontrar. Embora a carta de controlo aplicável aos resíduos seja uma ferramenta de inegável valor na melhoria dos processos, uma das suas desvantagens é a necessidade de ajustar e manter um modelo de séries temporais apropriado para cada variável do processo.

Agradecimentos

Ao Instituto Hidrográfico pela cedência dos dados, em particular à Eng.ª Pilar Pestana e aos colaboradores da Secção de Química Inorgânica – laboratório de nutrientes.

REFERÊNCIAS

Gomes, M. I., Figueiredo, F.,. Barão, M. I. (2010) Controlo Estatístico da Qualidade, 2 ed., Edições SPE.

Hunter, J. S. (1986) The exponentially weighted moving average. J. Quality Technology n. 8, p. 1-12.

Montgomery, D. C. (2009) Introduction to Statistical Quality Control, 6ª Ed, New York, USA, Wiley.

Pereira, Z. L.; Requeijo, J. G. (2012) Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos. 2ed. Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

Reynolds, M. R.; Lu, C.W. (1997) Control Charts for Monitoring Process with Autocorrelated Data, Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications, 30, 4059-4067.

Roberts, S. W. (1959) Control chart tests based on geometric moving averages. Technometrics n. 1, p. 239-250.

Wells, D.E., Cofino, W.P., Quevauviller, P. and B. Griepink (1993). Quality Assurance of Information in Marine Monitoring: A Holistic Approach. Marine Pollution Bulletin, vol.26. nº 7 pp 368-375.

Análise de metais em sedimentos – contribuição dos ensaios interlaboratoriais

A. Gama (1), T. Santos (1) e C. Palma (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, nº 49 1249-093 Lisboa, ana.gama@hidrografico.pt

Resumo: Desde a década de 80 que o Instituto Hidrográfico efetua análises de metais em sedimentos provenientes de áreas estuarinas, costeiras ou da plataforma continental. O trabalho analítico efetuado nas diversas etapas apresenta um rigoroso controlo de qualidade analítico interno e externo, garantindo a precisão, exatidão e robustez do mesmo. De entre os diversos fatores que contribuem para a avaliação do processo de análise destacam-se os exercícios de intercomparação laboratorial. Este trabalho particulariza os ensaios do programa QUASIMEME. Os ensaios interlaboratoriais requerem a participação ativa de mais de um laboratório, sendo as amostras sujeitas aos mesmos processos de preparação que as amostras reais. Os estudos QUASIMEME englobam dois exercícios anuais, com a determinação de metais sendo o desempenho do laboratório determinado estatisticamente através do z-*score*. O z-*score* é calculado através das concentrações do elemento existente na amostra em estudo, reportadas pelos diferentes laboratórios envolvidos no ensaio interlaboratorial.

Palavras-chave: Sedimentos, metais, ensaio interlaboratorial.

1. INTRODUÇÃO

As análises químicas efetuadas às amostras de sedimentos marinhos, estuarinos e de praia, podem ter diversas finalidades, tais como a caracterização geoquímica do meio marinho, a monitorização de efluentes e o apoio à decisão sobre o destino a dar a dragados. De modo a avaliar a qualidade dos resultados obtidos, o laboratório deve dispor de meios e critérios para demonstrarem que os métodos que executam conduzem a resultados adequados à qualidade pretendida.

Um parâmetro que deve ser avaliado é a exatidão das metodologias, ou seja, a concordância entre o resultado de um ensaio e o valor de referência aceite como convencionalmente verdadeiro.

Os ensaios interlaboratoriais destinam-se a avaliar o desempenho dos laboratórios participantes, uma vez que evidenciam a exatidão dos resultados de um determinado método de ensaio.

Desde 1993 que o Instituto Hidrográfico (IH) participa em diferentes exercícios interlaboratoriais, nomeadamente nos projetos QUASIMEME (*Quality Assurance of Information from Marine Environmental Monitoring in Europe*), AQUACON (*Analytical Quality Assessment, Control And Assurance Studies In The Mediterranean Basin*) e IAEA-MESL (*Marine Environmental Studies Laboratory, International Atomic Energy Agency, Marine Environmental Laboratory*). A avaliação do desempenho dos laboratórios no projeto QUASIMEME é efetuada através de um indicador estatístico (z-*score*) para cada parâmetro analisado. O valor de z é calculado através da expressão:

z = (concentração medida – valor aceite como verdadeiro da concentração) / Erro total.

Erro total = (valor aceite como verdadeiro x erro proporcional (%))/(100 + 0,5 x erro constante).

O valor de erro proporcional é de 12,5% para os metais e o erro total varia para cada metal, sendo monitorizados anualmente.

Os resultados obtidos para cada parâmetro são classificados em satisfatórios, questionáveis ou não satisfatórios de acordo com:

$|Z| \leq 2$ satisfatório

$2 < |Z| < 3$ questionável

$|Z| \geq 3$ não satisfatório

Idealmente o laboratório deveria ter sempre valores de $|Z|$ inferiores a 2, o que na prática nem sempre sucede. Nesses casos, deve-se elaborar um plano de ações corretivas tentando procurar as causas para o sucedido e a sua correção. Quando os resultados obtidos pelos diferentes laboratórios são significativamente diferentes uns dos outros o valor de z não é determinado.

O projeto IAEA-MESL avalia, de um modo idêntico ao projeto QUASIMEME, os resultados obtidos nas intercalibrações.

O projeto AQUACON envia, como resultados da participação nos exercícios, o número de laboratórios envolvidos e respetivos valores médios, mínimo, máximo e desvio padrão.

Os procedimentos analíticos utilizados no IH foram sujeitos ao longo dos anos a vários ensaios e modificações abrangendo os métodos de extração e os equipamentos utilizados. A participação nos EIL

foi permitindo por um lado, verificar a exatidão associada ao método de análise e, por outro lado, efetuar melhorias nos métodos de análise.

2. PARTICIPAÇÃO EM EXERCÍCIOS DE INTERCALIBRAÇÃO

O Projeto QUASIMEME faz parte da WEPAL (*Wageningen Evaluating Programmes for Analytical Laboratories*) desde 2011. O WEPAL encontra-se acreditado segundo o sistema de acreditação da Alemenha – *Dutch Accreditation Council RvA*, desde 2000.

A participação do IH nos estudos de desempenho laboratorial QUASIMEME teve início em 1993, tendo-se participado num total de 35 exercícios, havendo uma média de dois exercícios anuais. Os estudos cobrem a determinação de metais pesados em materiais teste de sedimentos marinhos. A Divisão de Química e Poluição do Meio Marinho (QP) do IH analisa 12 metais, especificados na Tabela I.

Tabela I. Metais analisados nos materiais teste dos exercícios QUASIMEME pela Divisão de Química e Poluição do Meio Marinho.

- Alumínio (Al)
- Arsénio (As)
- Cádmio (Cd)
- Chumbo (Pb)
- Crómio (Cr)
- Cobre (Cu)
- Ferro (Fe)
- Lítio (Li)
- Manganês (Mn)
- Mercúrio (Hg)
- Níquel (Ni)
- Zinco (Zn)

Cada material teste é preparado em grandes quantidades pelo QUASIMEME, sendo enviado uma pequena porção representativa para cada laboratório participante do exercício (Figura 1). A homogeneidade do material teste é tida em consideração. Após chegada aos laboratórios da QP, o material teste deve ser tratado conforme as amostras de rotina laboratorial, devendo no entanto ser analisadas no mais breve intervalo de tempo possível.



Fig. 1. Amostras QUASIMEME – Round 2016-1.

Após a análise laboratorial, os dados obtidos são reportados eletronicamente, através do preenchimento do formulário de resultados disponibilizado no *sharepoint* do site do QUASIMEME, especificando-se o tratamento da amostra (digestão OSPAR – ataque forte com recurso a ácidos fortes: HF, HNO_3 e HCl / digestão EPA – ataque fraco com recurso ao ácido HNO_3), técnica de análise (espetroscopia de absorção atómica por chama / gerador de hidretos – As / combustão - Hg), normas utilizadas e outros.

Nos últimos 30 anos o IAEA – *MESL Marine Environmental Studies Laboratory* tem vindo a desenvolver estudos de desempenho a nível mundial, assim como exercícios de comparação interlaboratorial. Este trabalho tem vindo a ser conduzido em colaboração com o Programa *United Nations Environmental Programme* (UNEP) *Regional Seas Programme* (IAEA/AQ/46, 2016).

A QP participou em três exercícios organizados pela IAEA – MESL, em anos distintos (Tabela II).

Tabela II. Exercícios de intercalibração no âmbito do projeto IAEA-MESL.

Data	Exercício IAEA-MESL
Julho 1998	IAEA – 405
Junho 2003	IAEA – 433
Junho 2011	IAEA - 457

Em cada exercício interlaboratorial da IAEA-MESL a amostra teste devidamente identificada encontrava-se agrupada com um documento informativo e com formulário de resultados para posterior preenchimento e envio. Todos os resultados foram sujeitos a um tratamento confidencial, e cada laboratório foi identificado com um número / código individual.

O projeto AQUACON organizou dois exercícios com amostras de sedimento e soluções de metais preparadas com padrões e livre de interferências de matrizes (Tabela III).

Tabela III. Exercícios de intercalibração no âmbito do projeto AQUACON.

Data	Exercício / projeto AQUACON
Junho 1998	Sample 1/96 Sample 2/96 Sample 3/96
Abril 2000	Sample 7 a 9 Sample 11 a 19

Neste período foram efetuadas alterações relativamente às quantidades de ácidos utilizadas nas digestões (Palma et al., 2002), assim como evoluções dos equipamentos de aquecimento utilizados: 1987 a 1999 em banho-maria e a partir de 2000 até hoje em microondas. Em 2002 e 2016 foram adquiridos novos equipamentos para a quantificação de metais em águas marinhas, sedimentos e biota, por espectrofotometria de absorção atómica com chama. O mercúrio foi analisado até 2003 por espetrometria de absorção atómica - vapor frio, após a digestão. A partir de 2003 passou a ser efetuada a quantificação com a amostra sólida, sem tratamento prévio, por espetrometria de absorção atómica - combustão. Os ensaios efetuados que conduziram ao método utilizado em rotina constam no relatório, "Comparação de métodos de extração de metais em sedimentos" (Palma & Valença, 2006).

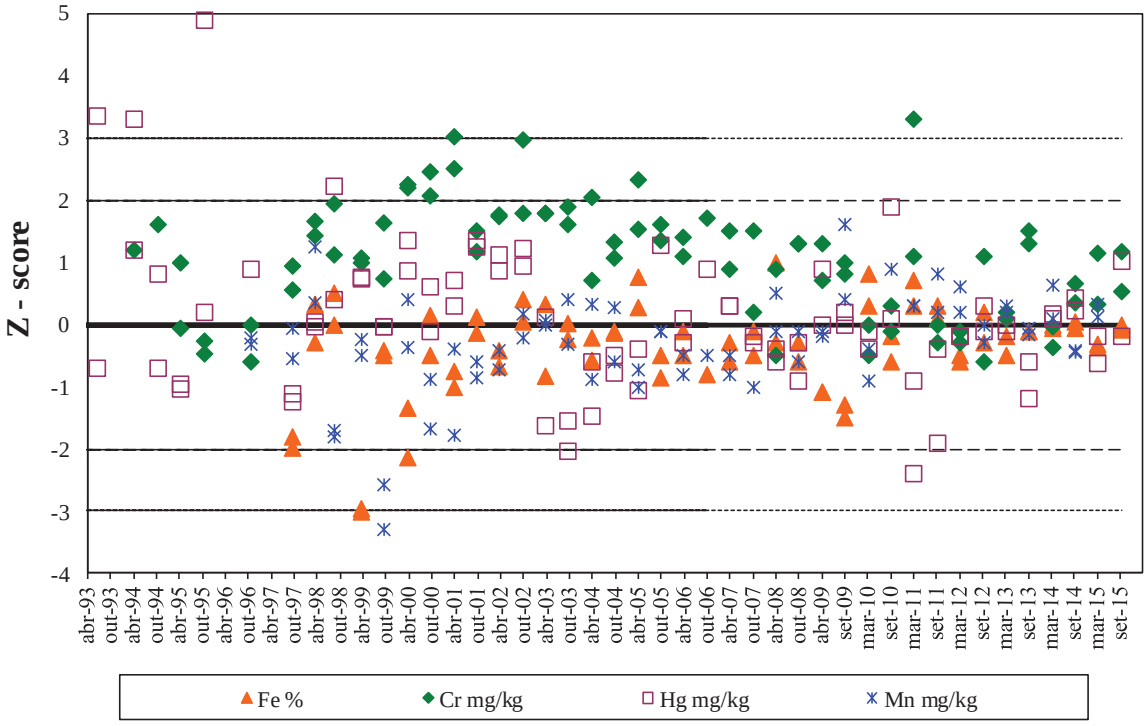


Fig. 2. Valores de z-score obtidos nos ensaios interlaboratoriais QUASIMEME desde 1993, para Fe, Cr, Hg e Mn.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 apresentam-se os valores de z-*score* obtidos nos ensaios interlaboratoriais QUASIMEME de abril 1993 a setembro 2015, para os elementos Fe, Cr, Hg e Mn.

É possível verificar que:

Ferro

- Reportados resultados desde outubro 1997;
- Valores de z-*score* não satisfatório em abril de 1999;
- Valores de z-*score* questionáveis em outubro de 1997 e abril 2000;
- Todos os restantes z-*scores* são considerados satisfatórios;
- Valores de z-*score* tendencialmente negativos;
- Em 2010 efetuou-se uma análise pormenorizada dos valores de z-*score*. De modo a corrigir a tendência negativa, foram efetuados estudos no método de determinação de Ferro. Com a adição de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) aos padrões da reta de calibração e às amostras, verificou-se que os valores de z-*score* se aproximaram mais do valor zero;
- Valores de z-*score* com melhoria significativa a partir de 2010, devido à correção efetuada com $CaCO_3$, confirmando-se uma melhoria da técnica de análise de Fe.

Crómio

- Reportados resultados desde abril 1994;
- Valores de z-*score* não satisfatório em abril de 2001, outubro de 2002 e março de 2011;
- Valores de z-*score* questionáveis em abril de 2000, outubro de 2000, abril 2001, abril de 2004 e abril de 2005;
- Todos os restantes z-*scores* são considerados satisfatórios;
- Valores de z-*score* tendencialmente positivos;
- Em 2010 efetuou-se correção de tendência positiva dos valores de z-*score*, recorrendo-se ao tratamento dos padrões da reta de calibração e das amostras com cloreto de lantânio;
- A partir de 2010 / 2011 valores de z-*score* dispersos, sem apresentação de tendência específica.

Mercúrio

- Reportados resultados desde abril 1993;
- Valores de z-*score* não satisfatório em abril de 1993, abril de 1994 e outubro de 1995;
- Valores de z-*score* questionáveis em outubro 1998, outubro 2003 e março 2011;
- Todos os restantes z-*scores* são considerados satisfatórios;
- Valores de z-*score* dispersos, sem tendência específica.
- A partir de 2003 a quantificação de Hg deixa de ser efetuada por espetrometria de

absorção atómica - vapor frio, após a digestão, passando a ser efetuada por espetrometria de absorção atómica - combustão. Os valores satisfatórios de z-*score* obtidos neste período, confirmam o bom desempenho da técnica.

* Manganês

- Reportados resultados desde outubro 1996;
- Valores de z-*score* não satisfatório em outubro 1999;
- Valores de z-score questionáveis em outubro 1999;
- Todos os restantes z-*scores* são considerados satisfatórios;
- Valores de z-*score* tendencialmente negativos até abril 2009. A partir de setembro 2010 valores de z-*score* tendem a positivo.
- Em 2010 efetuaram-se diversos estudos de modo a corrigir a tendência negativa dos valores de z-*score*, no Mn. A adição de cloreto de lantânio aos padrões da reta de calibração e às amostras, permitiu corrigir a tendência negativa, verificando-se uma melhoria significativa da técnica de análise de Mn.

4. CONCLUSÕES

Os ensaios interlaboratoriais são definidos como uma organização, execução e avaliação nos mesmos itens de ensaio ou semelhantes (objetos e materiais) que abrangem, no mínimo, a participação ativa de pelo menos dois laboratórios diferentes e em condições pré-determinadas, embora estatisticamente só sejam conclusivos os resultados obtidos com pelo menos cinco laboratórios participantes. Esta é uma ferramenta de elevada relevância quer na Garantia da Qualidade quer no Controlo da Qualidade (Guia Relacre nº7, 1996).

Através da participação em ensaios interlaboratoriais, o IH tem a capacidade de demonstrar as suas aptidões técnicas, ficando possibilitado de constatar os seus erros sistemáticos (flutuações originárias de falhas de método empregado ou erros do operador), dar início a ações corretivas e trabalhar em padronização juntamente com os restantes laboratórios externos.

De um modo geral, participam nos ensaios de comparação interlaboratorial os laboratórios acreditados e os laboratórios não acreditados, com interesse na avaliação do seu próprio desempenho (Guia ISO, 1996).

Desde 1993 que o IH participa em diferentes exercícios interlaboratoriais, nomeadamente nos projetos QUASIMEME, AQUACON e IAEA-MESL.

Este trabalho incide nos ensaios do programa QUASIMEME, fazendo referência aos resultados do Fe, Cr, Hg e Mn.

Para avaliação do desempenho nos ensaios interlaboratoriais foi determinado o z-*score*, sendo este a relação entre a diferença da média do valor obtido e do valor verdadeiro, com o desvio máximo admissível.

Analisando os valores de z-*score* de cada um dos elementos estudados, foi possível verificar que existe um comportamento distinto. De um modo geral, os valores de z-*score* foram considerados satisfatórios, havendo, no entanto, casos pontuais de valores de z-*scores* questionáveis e mesmo não satisfatórios.

A participação em EIL permitiu, igualmente, verificar a existência de tendências negativas nos valores de z-*score* para os elementos Fe e Mn, e tendência positiva para o Cr. Deste modo, e em 2010, foram realizados diversos estudos nas técnicas de análise destes elementos, de modo a corrigir as tendências constatadas. Através da adição de $CaCO_3$ (no caso do Fe) e do cloreto de lantâneo, (para o Mn e Cr), verifica-se uma melhoria dos valores de z-*score* ao longo dos anos, atestando-se assim uma melhoria nas técnicas de análise e nos resultados laboratoriais.

REFERÊNCIAS

IAEA Analitical Quality in Nuclear Applications Series nº 46 (2016), Worldwide Interlaboratory Comparison on the Determination of Trace Elements in the IAEA-457 Marine Sediment Sample, International Atomic Energy Agency, IAEA/AQ/46.

Guia Relacre nº7 (1996), Ensaios Interlaboratoriais em Química, Membros da Comissão Técnica Relacre_CTR 03 – Ensaios Químicos.

Guia ISO 43 (1996), Proficiency Testing by Interlaboratorial Comparisions, 2ª Edição.

Palma et al., (2002), Teores de metais em sedimentos: digestão total vs digestão parcial, *Anais do Instituto Hidrográfico*, 16, 2002-2003.

Palma e Valença, (2006), Comparação de métodos de extração de metais em sedimentos, IH.

Compostos orgânicos no sedimento superficial do rio Tejo: caso prático da Valorsul

P. Santos (1), A.C. Rocha (1) e C. Palma (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49 1249-093 Lisboa; paula.santos@hidrografico.pt.

Resumo: Da vasta diversidade de contaminantes orgânicos, os bifenilos policlorados (PCBs), pesticidas organoclorados (DDTs) e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) carecem de especial atenção. Devido ao seu carácter persistente têm tendência a se fixar nos organismos e nos sedimentos, funcionando estes como um reservatório e fonte secundária de contaminação. Em quatro pontos estratégicos do estuário do rio Tejo têm sido analisados estes compostos no sedimento, com o objetivo de monitorizar as emissões decorrentes de uma estação de tratamento de resíduos sólidos urbanos. No sentido de efetuar um estudo alusivo à qualidade do sedimento, nos últimos quatro anos foram avaliados os contaminantes mais abundantes, suas fontes emissoras, o risco potencial carcinogénico, utilizando os fatores de equivalência de toxicidade (*TEF*), e o potencial risco para o ecossistema por aplicação dos guias de qualidade para sedimento (SQGs).

Palavras-chave: Contaminantes orgânicos, monitorização ambiental, sedimentos.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento das zonas urbanas, associado ao desenvolvimento da agricultura intensiva e crescente industrialização, contribuíram para que um vasto e diversificado número de substâncias químicas provenientes destas atividades fossem introduzidas nos ecossistemas marinhos.

Destes compostos, os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), provenientes principalmente da atividade antropogénica (e.g. derrames de produtos petrolíferos e combustão de biomassa e petróleo) (Tobiszewski, M. e Namieśnik, 2012), os bifenilos policlorados (PCBs), usados no passado em fluidos de aquecimento (e.g. equipamentos elétricos e hidráulicos entre outros) e os pesticidas organoclorados (DDTs) utilizados no setor agrícola e no controlo de pragas, assumem particular importância por serem poluentes orgânicos persistentes (POPs). Estes compostos possuem baixa solubilidade em água e carácter hidrofóbico, tendo tendência a acumular no sedimento, acabando por ser este o destino final de muitos contaminantes nos ecossistemas aquáticos (Dalia *et al*., 2012).

Neste âmbito, e sendo a matriz sedimento um dos melhores meios para monitorização de longo prazo de muitos POPs, desde o ano 2000, quatro pontos localizados no estuário do Rio Tejo na zona envolvente à estação de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos de Lisboa (Valorsul) têm vindo a ser monitorizados. O presente trabalho faz o estudo dos últimos quatro anos para um conjunto de contaminantes tais como os 7 PCBs[1], pesticidas organoclorados (DDTs[2]) e 18 PAHs[3], 16 dos quais considerados como poluentes prioritários pela *United States Environmental Protection Agency* (US EPA).

Pretende-se avaliar os contaminantes mais abundantes, as fontes de emissão e o risco potencial carcinogénico, através do Fator Benzo(a)pireno Equivalente (BaPE), obtido pela soma dos PAHs com evidência cancerígena/mutagénica, após a concentração de cada um ser multiplicada pelo respetivo Fator de Equivalência de Toxicidade (TEF_i) (Arias *et al.*, 2010). No sentido de analisar o potencial risco para o ecossistema de cada local pretende-se também avaliar a qualidade do sedimento por comparação com dois conjuntos de guias internacionais de qualidade para sedimento (SQGs): *threshold effect level* (*TEL*) e *probable effect level* (PEL) (MacDonald *et al.*, 1996) e *effects range-low* (*ERL*) e *effects range-median* (*ERM*) (Long *et al.*, 1995).

2. ÁREA DE ESTUDO E METODOLOGIA

2.1 Área e Período de Estudo

O programa de monitorização da zona envolvente à Valorsul avalia a qualidade da água e do sedimento em quatro pontos, três destes situam-se no estuário do rio Tejo (La1, La2 e La3) e um outro no final de uma vala de drenagem, a estação Lb, que lança no

[1]7 PCBs=PCB28, PCB52, PCB101, PCB118, PCB138, PCB153, PCB180.

[2]DDTs=isómeros de DDT (*o,p'*-DDT, *p,p'*-DDT) e seus metabolitos (*o,p'*-DDE, *p,p'*-DDE, *o,p'*-DDD, *p,p'*-DDD).

[3]Perileno (Per), Benzo(e)pireno (BeP) e os 16 PAHs prioritários pela US EPA: Naftaleno (N), Acenaftileno (Acy), Acenafteno (Ace), Fluoreno (F), Fenantreno (Phe), Antraceno (A), Fluoranteno (Fluo), Pireno (P), Benzo(a)antraceno (BaA), Criseno (Chr), Benzo(b)fluoranteno+ Benzo(k)fluoranteno (B(b+k)F), Benzo(a)pireno (BaP), Indeno(1,2,3-cd)pireno (Ind), Dibenzo(a,h)antraceno (DBA) e Benzo(g,h,i)perileno (BghiP).

rio água proveniente de fontes não controladas (Fig.1). O período de estudo compreende as amostragens realizadas de 2012 a 2015 na matriz sedimento. Cada uma das estações de amostragem foi caracterizada pela concentração média do parâmetro nesse período de tempo.



Fig.1. Localização das estações de amostragem.

2.2 Procedimento Analítico

As amostras de sedimento foram colhidas com draga do tipo *Smith-McIntyre*, peneiradas por via húmida com peneiro de malha 2 mm e congeladas a -18 ºC. Posteriormente foram liofilizadas e moídas. As amostras foram extraídas de acordo com as metodologias internas em vigor e o teor em pesticidas e PCBs determinado por Cromatografia Gasosa acoplada a um Detetor de Captura Eletrónica e os PAHs por Cromatografia Gasosa- Espetrometria de Massa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Distribuição dos Diferentes Contaminantes

Para efeitos de interpretação dos principais contaminantes nas estações em estudo são apresentadas, na Fig. 2, as distribuições para os PCBs, DDTs e PAHs. Verifica-se que as estações no estuário apresentam distribuição semelhante para os 7 PCBs em estudo, no entanto o PCB52 não foi detetado na estação La1. São os congéneres penta (PCB101 e PCB118) e hexaclorados (PCB138 e PCB153) os que mais contribuem para o ∑PCBs[4] no sedimento para as estações La1, La2 e La3. No caso da estação Lb, o PCB28 é o congénere dominante com 24% do ∑PCBs. No entanto, os congéneres menos clorados (PCB28 e PCB52) representam apenas 12-13% do ∑PCBs para as restantes estações. Os PCBs com mais de 5 átomos de cloro na molécula são mais estáveis e resistentes á degradação, acumulando-se no sedimento em concentrações mais elevadas (Dalia *et al.*, 2013). Por outro lado, os congéneres menos clorados são os que apresentam maior solubilidade em água, facilitando o seu transporte para longe da fonte de origem. Na estação La1, nenhum dos DDTs foi quantificado. Porém, na La2 apenas o *p,p*'-DDE é estimado sendo este, na Lb e La3, o parâmetro dominante, representando 50% e 37% do ∑DDTs[5], respetivamente. Nestas duas estações também se regista a presença de DDD[6] e DDT[6] embora a sua contribuição individual para o ∑DDTs seja inferior à do *p,p*'-DDE. Relativamente aos PAHs, o Perileno é bastante abundante nas estações La3 (45%) e Lb (23%).

Nas restantes estações, são o Fluoranteno (8-33%), o Pireno (7-29%), o Benzo(b+k)fluoranteno (8-15%) e o Criseno (4-14%) os PAHs predominantes. Contudo, nas estações La1 e La2 o Fenantreno pode também ser encontrado em percentagens semelhantes ao Benzo(b+k)fluoranteno e ao Criseno (cerca de 16% na La1 e de 9% na La2).

[4] ∑PCBs=soma do PCB28, PCB52, PCB101, PCB118, PCB138, PCB153, e PCB180.
[5] ∑DDTs=soma do *p,p'*-DDT, *o,p*'-DDT, *p,p'*-DDE, *op*'-DDE, *p,p'*-DDD e *o,p*'-DDD.
[6] DDD, DDE e DDT=isómeros *o,p' e p,p'*.

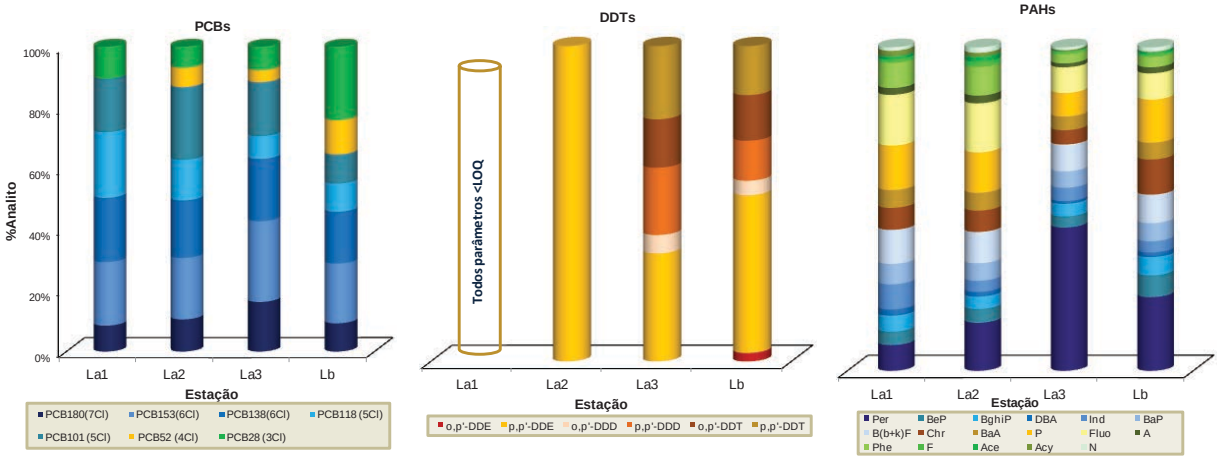


Fig.2. Distribuição média de contaminantes orgânicos por estação de amostragem. PAHs: tons de verde – 2-3 anéis, tons de amarelo e castanho – 4 anéis, tons de azul – 5-6 anéis.

Pela distribuição dos PAHs pode-se já aferir relativamente às suas fontes. Verifica-se prevalência de PAHs de 5-6 anéis em todas as estações, à exceção da La1 com dominância dos PAHs de 4 anéis, seguido também de grandes contribuições de PAHs de 5-6 anéis. Este facto aponta a formação dos PAHs a partir de processos de combustão incompleta.

3.2 Fontes de contaminação

Na Fig.3(a) estão representadas as razões (*p,p´*-DDD+*p,p'*-DDE)/∑DDTs e *p,p'*-DDD/*p,p'*-DDE e respetivos limites (linhas a tracejado) que permitem identificar o tempo de residência do DDT e as condições do meio, respetivamente.

A razão (*p,p´*-DDD+*p,p'*-DDE)/∑DDTs>0,5 sugere um tempo de residência longo, indicando resistência à degradação. Se a razão<0,5 registam-se contribuições recentes destes compostos para o meio. A razão *p,p'*-DDD/*p,p'*-DDE reflete as condições de degradação: aeróbica se razão>1 e anaeróbica se razão<1 (El Nemr *et al*., 2012; Dalia *et al*., 2013).

Apenas no ano de 2013 (Fig. 3(a)) as estações La3 e Lb registaram novas entradas de DDT, nos restantes anos todas as estações registam este composto como antigo no meio. Todas as estações têm condições aeróbicas dando-se a biodegradação do DDT em DDE, o que justifica, a predominância deste metabolito.

Na Fig.3 (b) estão apresentadas razões entre PAHs e respetivas faixas limítrofes (linhas a tracejado) que possibilitam discriminar fontes de PAHs. Razões não representadas não foram determinadas pois pelo menos um dos componentes que participam no seu cálculo eram <LOQ (La1-2012 e 2014 não estão representadas razões; La1-2015 não foi quantificada A/(A+Phe); La2-2012 não foram quantificadas BaA/(BaA+Chr) e Ind/(Ind+BghiP) e La2-2013 não foi quantificada Ind/(Ind+BghiP)).

Os PAHs presentes na área em estudo são, na sua grande maioria, produzidos por processos de combustão de biomassa (Fig.3 (b)). No entanto, para a estação Lb, verifica-se também uma assinatura da combustão de combustíveis fosseis.

3.3 Risco Potencial Carcinogénico dos PAHs

O potencial carcinogénico/mutagénico dos PAHs é estimado em termos de Benzo(a)pireno (BaPE). Este fator é obtido pela soma dos produtos entre as concentrações individuais dos PAHs com evidência cancerígena (BaA, Chr, B(b+k)F, BaP, Ind e DBA) e o respetivo Fator de Equivalência de Toxicidade (TEF_i) (Arias *et al.*, 2010). Na Fig.4 estão representados os BaPE conjuntamente com os ∑PAHs tóxicos (barras a azul) e de ∑PAHs cancerígenos (barras a amarelas).

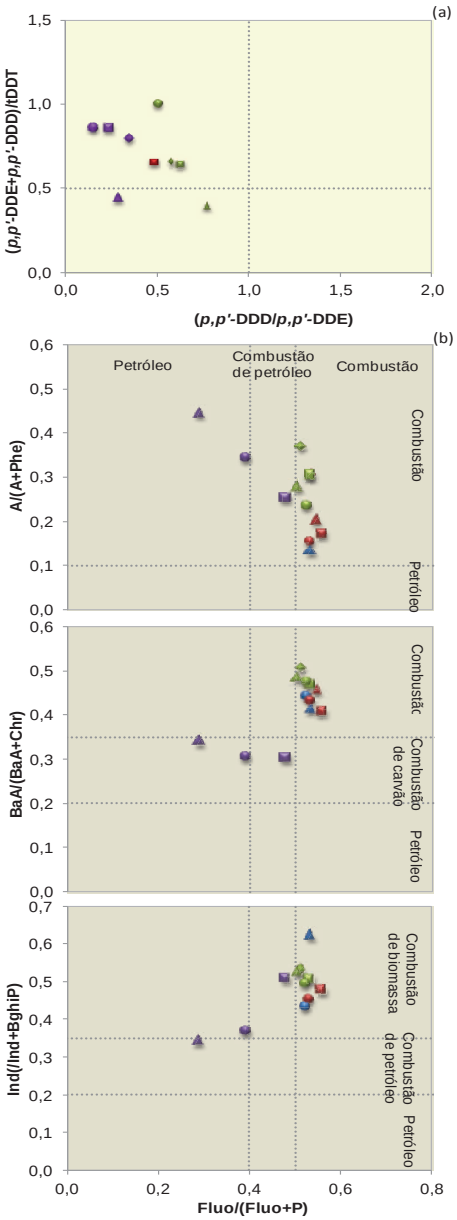


Fig.3. Razões (a) entre metabolitos de DDTs e entre metabolitos de DDTs e o ∑DDTs e (b) razões entre PAHs: ● La1; ● La2, ● La3 e ● Lb;◆ 2012, ▲ 2013, ■ 2014, ● 2015.

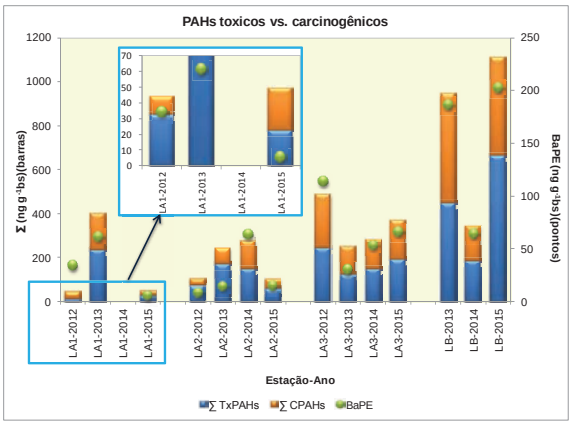


Fig.4. Ocorrência de PAHs tóxicos vs. cancerígenos e teor em BaPE por estação/ano (concentrações em base seca (bs); ausência de resultados: todos os parâmetros <LOQ).

Verifica-se que BaPE varia entre 6 e 203 ng g^{-1}; os valores mais altos são encontrados para La3 e Lb, sendo que este parâmetro segue a tendência La1<La2<La3<Lb. Apesar de serem encontrados, para a La1, valores mais altos (Min-Max: 54-74%) de PAHs carcinogénicos, relativizados ao total de PAHs analisados (exceto Per), comparativamente aos encontrados para Lb (Min-Max: 40-53%), o poder carcinogénico do sedimento é mais reduzido pelo facto dos PAHs carcinogénicos na La1 se encontrarem em concentrações inferiores que na Lb (Min-Max: <LOQ-44 ng g^{-1} para La1 e 5-154 ng g^{-1} para Lb).

3.4 Avaliação do Risco Ecotoxicológico

Comparando os teores em ∑PCBs, ∑DDTs e ∑PAHs[7] com os guias de qualidade do sedimento ERL e TEL (Fig.5), verifica-se que o ∑PCBs é inferior aos valores guia em todas as estações, o ∑DDTs excede os guias (ERL=1,58 ng g^{-1} e TEL=3,89 ng g^{-1}), os PAHs excedem apenas o guia (TEL=655 ng g^{-1}) na estação Lb e, na La3, apenas o ∑DDTs excede o guia ERL sugerindo que podem ocorrer efeitos biológicos adversos ocasionalmente para a flora e fauna bentónica associada (Arias *et al.*, 2010). Nas outras estações as concentrações de ∑DDTs e ∑PAHs são inferiores aos respetivos valores guia não sendo esperados efeitos adversos relativamente a estes compostos. Os valores guia ERM e PEL não foram representados na Fig.5 por serem valores muito superiores aos obtidos no estudo.

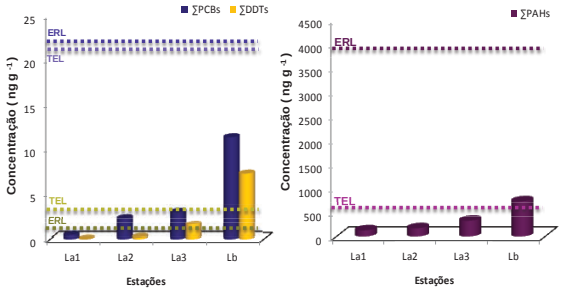


Fig.5. Comparação dos teores em ∑PCBs, ∑DDTs e ∑PAHs com os SQGs: _ e _ ERL e TEL para ∑PCBs; _ e _ ERL e TEL para ∑DDTs; _ e _ ERL e TEL para ∑PAHs, respetivamente .

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A área em estudo demonstra a influência de diferentes focos de pressão antropogénica. Em termos de concentrações em contaminantes orgânicos verifica-se a tendência crescente La1<La2<La3<Lb.

A estação Lb apresenta teores em poluentes orgânicos superiores aos das restantes estações. Este facto é devido ao assoreamento da zona, que apenas comunica com o rio na situação de preia-mar e, ocorrendo descargas industriais não controladas leva a que os compostos estudados se acumulem no sedimento.

A presença de resíduos de bifenilos policlorados sugere o uso destes na indústria e o seu carácter persistente no ambiente. Os resíduos de pesticidas detetados em algumas das estações revelam DDT com tempo de residência longo e o *p,p*'-DDE como metabolito dominante, demonstrando a biodegradação do DDT em condições aeróbicas em todas as estações.

Os PAHs de 5-6 anéis prevalecem em todas as estações, exceto na La1, com predominância dos PAHs de 4 anéis possuindo também PAHs de 5-6 anéis. Estes factos apontam para uma origem pirolítica, ou seja formação dos PAHs a partir de processos de combustão incompleta.

Os guias de qualidade de sedimento sugerem a ocorrência de efeitos adversos ocasionalmente para a fauna e flora betónica nas estações La3 e Lb.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Valorsul, S.A a autorização para o uso dos dados utilizados no presente trabalho.

REFERÊNCIAS

Arias, A.H., Marcovecchio, J.E., Freije, R.H., Ponce-Velez, G., Botello, A.V. (2010). Sources analysis and equivalent toxicity assessment of PAHs impacted sediments in Bahia Blanca Estuary, Argentina. *Hidrobiológica*, 20, 41-56.

Dalia, A., Khaled, A., El Nemr, (2013). Assessment of pesticides and polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments of the Egyptian Mediterranean Coast *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 39,141-152.

El Nemr, A., Moneer,A., Khaled,A., El-Sikaily (2012). Contamination and risk assessment of organochlorines in surface sediments of Egyptian Mediterranean coast. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 38, 7-21.

Long, E.R, MacDonald, D.D., Smith, S.L., Calder, F.D. (1995). Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 19, 81-87.

MacDonald, D.D., Carr, R.S., Calder, F.D., Long, E.R., and Ingersoll, C.R. (1996). Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters. *Ecotoxicology*, 5, 253-278.

Tobiszewski, M. e Namieśnik, J. (2012). PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources. *Enviromental Pollution*, 162, 110-119.

[7] ∑PAHs=soma 16 PAHs prioritarios pela US EPA+BeP.

Análise de tendências no desenvolvimento fitoplantónico em zonas costeiras portuguesas recorrendo a dados de campo e de deteção remota: Estudo preliminar no Estuário do Tejo

A. Mendonça (1), C. Borges (1) e C. Palma (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa, ana.mendonca@hidrografico.pt.

Resumo: O fitoplâncton é responsável por uma importante parte da produção primária aquática, sendo a sua biomassa quantificada através da concentração de clorofila a. Como resultado do Programa de Vigilância da Qualidade do Meio Marinho (VQM), o Instituto Hidrográfico tem um vasto registo de dados de fitopigmentos, determinados por espectrometria de absorção molecular. Com o objetivo de complementar as séries temporais de uma década desses dados e estabelecer tendências sazonais no desenvolvimento fitoplantónico no Estuário do Tejo, recolheram-se dados de clorofila a de imagens de satélite, para o mesmo período. Estas imagens foram analisadas e procuraram-se dados de dias coincidentes com os de amostragem ("match-ups") para sua comparação e validação. Confirmou-se que o algoritmo OC3 do MODIS conduz a uma sobrestimação da concentração de clorofila a no estuário do Tejo. No entanto, apesar do reduzido número de "match-points", conseguiu-se uma razoável correlação ($r=0,79$; $p<0,05$) entre os dados VQM e os de satélite.

Palavras-chave: fitoplâncton marinho, clorofila a, séries temporais, cor do oceano, deteção remota.

1. INTRODUÇÃO

O fitoplâncton é responsável por uma importante parte da produção primária aquática. No entanto, quando o seu desenvolvimento é excessivo, pode originar situações de eutrofização e de toxicidade. Assim, a sua abundância está incluída no anexo V da Diretiva Quadro da Água (DQA) como elemento de qualidade para a avaliação do estado ecológico das águas de superfície costeiras e de transição (CE, 2000). Sendo essa avaliação baseada no desvio às condições normais esperadas para essas águas, importa defini-las. Para tal, torna-se útil conhecer o padrão histórico (tendências temporais e espaciais) no desenvolvimento do fitoplâncton no seio de determinada massa de água.

Por forma a contribuir para a plataforma de informação sobre avaliação da qualidade do ambiente marinho, no âmbito do "Programa Conjunto de Monitorização (JAMP) da Comissão de Oslo e Paris (OSPAR)", o Instituto Hidrográfico (IH), através da sua Divisão de Química e Poluição do Meio Marinho, iniciou em 1981 o programa "Vigilância da Qualidade do Meio Marinho (VQM)", constituído por quatro projetos, que correspondem a quatro zonas da Costa Portuguesa sujeitas a pressões antropogénicas: o Sistema Lagunar da Ria de Aveiro (POLAveiro), o Estuário do Tejo (POLTejo), o Estuário do Sado (POLSado) e a Ria Formosa (POLFaro) (Valença *et al.*, 2011). Como resultado do programa VQM, o IH detém um vasto acervo de dados de parâmetros químicos referentes às áreas estudadas, nos quais se incluem as concentrações de pigmentos fotossintéticos, utilizados como biomarcadores do desenvolvimento de fitoplâncton.

Teoricamente, pela análise das séries temporais desses dados, seria possível inferir um historial de tendências temporais. No entanto, esses dados resultam de campanhas de amostragem pontuais, com uma frequência que varia desde a uma vez por mês até duas vezes por ano. Como resultado, podem representar meras situações discretas, não refletindo o comportamento do fitoplâncton durante o período não amostrado que pode corresponder a dez meses num ano.

Esta lacuna poderá ser ultrapassada através da obtenção de dados de clorofila a, obtidos a partir de imagens de satélite da cor do oceano. Sensores óticos situados em plataformas orbitais e a operar nas gamas do visível e do infravermelho próximo permitem a quantificação deste pigmento fotossintético até alguns metros de profundidade, dentro da zona eufótica (Martin, 2014). Estes sensores detetam as propriedades óticas aparentes da água (tais como a reflectância) e, a partir destas, estimam as suas propriedades óticas inerentes, nas quais se incluem a absorvância dos pigmentos fotossintéticos (Martin, 2014). Quando a cor da água se deve essencialmente à presença de pigmentos fotossintéticos, a estimativa da biomassa fitoplantónica é possível através de algoritmos empíricos simples que relacionam razões de reflectância, a comprimentos de onda específicos (situados nas gamas do azul e do verde), com a concentração de clorofila a (Blondeau-Patissier *et al.*, 2014). Estas massas de água designam-se por águas caso 1 e correspondem essencialmente a zonas

oceânicas e de mar aberto (Blondeau-Patissier *et al.*, 2014).

Porém, em zonas costeiras e estuarinas, caracterizadas por águas caso 2, existem em abundância outros componentes oticamente ativos, tais como a matéria orgânica dissolvida (CDOM - "*coloured dissolved organic matter*") e os sedimentos inorgânicos em suspensão. Estes componentes podem contribuir significativamente para a cor, conduzindo a uma sobrestimação da concentração da clorofila a (Blondeau-Patissier *et al.*, 2014). Assim, dada a elevada complexidade e variabilidade na composição das águas caso 2, os valores de clorofila a, determinados pelos sensores de deteção remota necessitam de validação local com dados de concentração desses pigmentos fotossintéticos, determinados a partir da análise de amostras de água, recolhidas nos mesmos locais e numa hora próxima aos dos dados de imagens satélite, designados por "match-points" (Mota, 2012; Sá *et al*., 2008).

Com o presente estudo pretende-se avaliar a possibilidade de se detetarem tendências históricas no desenvolvimento fitoplantónico, através da utilização de dados de concentração de pigmentos fotossintéticos obtidos num dos projetos do programa VQM, o POLTejo, complementados com séries de dados obtidos por deteção remota, após a sua validação com "match-points".

2. METODOLOGIA

Na figura 1, encontra-se representada a área em estudo, bem como a localização dos pontos de amostragem VQM. Na mesma figura encontram-se as séries temporais de 41 dias, compreendidos entre Setembro de 1997 e Setembro de 2009, dos dados de concentração de clorofila a, quantificados na fracção inferior a 0,45 μm, através de espectrofotometria no UV-Visível, de acordo com o descrito em Valença et al (2011). Como já foi referido, estas séries resultam de dados discretos. Assim, as suas linhas podem não representar a real variação nos valores de concentração de clorofila a, razão pela qual são representadas a tracejado.

Para preencher essa lacuna de dados, procuraram-se valores de concentração de clorofila a obtidos por deteção remota, a partir de imagens satélite de cor do oceano (nível 2), disponíveis na plataforma "Ocean Color Web" (NASA, s.d.). Existe um historial desses dados desde Setembro de 1997, obtidos através do "Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor" (SeaWiFS) a bordo do satélite SeaStar. Este sensor possuía 8 canais de comprimentos de onda, dos quais 6 operavam na gama do visível e 2 no infravermelho próximo (NASA, s.d.). A concentração de clorofila a é estimada a partir dos dados de refletância obtidos por este sensor, usando o algoritmo OC4 (Mota, 2012). Na tabela I encontram-se descritos os sensores, cujas imagens foram consultadas para a obtenção dos dados de clorofila a, bem como os algoritmos associados e respectivas resoluções espaciais.

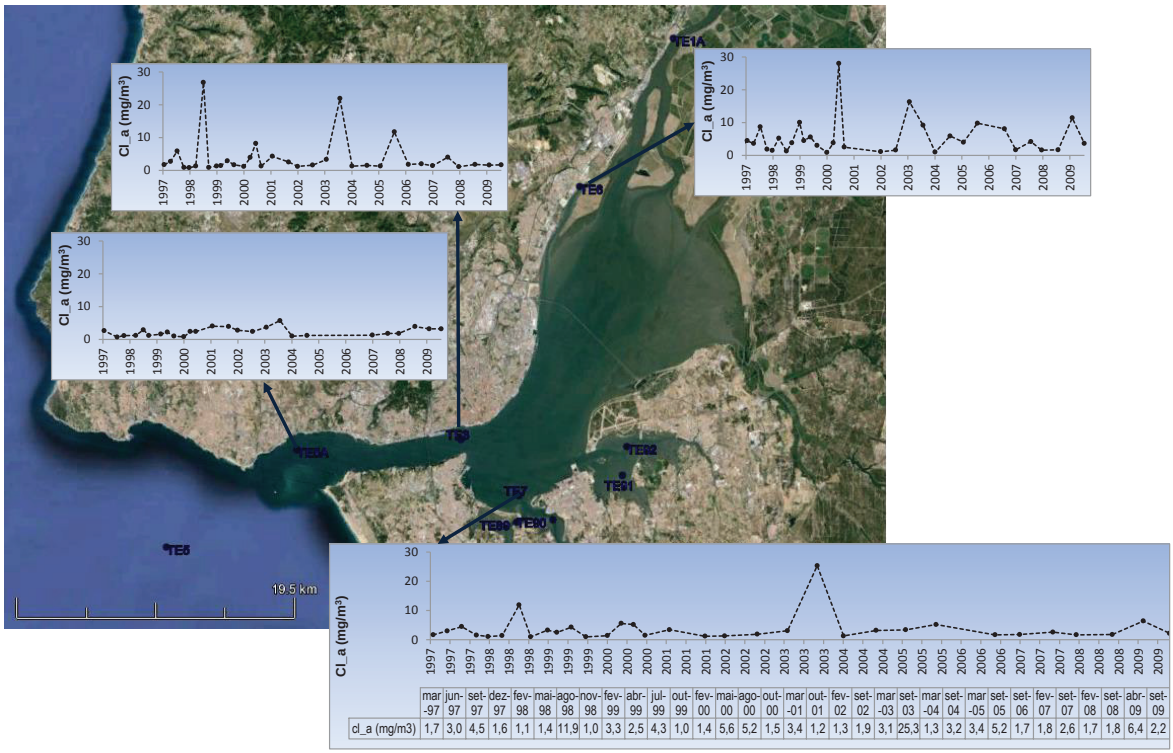
Tabela I: Sensores cujas imagens foram consultadas para a obtenção de dados de clorofila a, algoritmos associados e resolução espacial das suas imagens.

Sensor, agência	Satélites	Algoritmo	Resolução
SeaWiFS, NASA	Seasat	OC4	1x1 km^2
MODIS, NASA	TERRA e AQUA	OC3	1x1 km^2
MERIS, ESA	Sentinel	OC4	260x300 m^2

Para cada sensor, foram procuradas imagens válidas para os dias coincidentes com os da amostragem efetuada no âmbito do programa VQM. Foram consideradas como imagens válidas aquelas em que o varrimento inclui a área de estudo (e. g. latitudes compreendidas entre 38,9613N e 38,5690N e longitudes de 9.5108W e 8.8079W; sistema de coordenadas WGS 84 decimal) e cujo céu se encontre sem nuvens, dado que estas não permitem a visualização da cor do oceano.

As imagens obtidas foram visualizadas na aplicação BEAM VISAT (Brockmann Consult), desenvolvida para visualização e processamento de produtos de imagens satélite. Foram selecionadas as imagens cujos atributos dos pixeis permitissem uma razoável definição do contorno do estuário do Tejo. Nessas imagens, os valores de clorofila a, foram obtidos para as coordenadas dos pontos de amostragem VQM selecionados, para posterior comparação com os valores obtidos nas campanhas VQM.

A comparação dos "match-poins" foi efetuada através da correlação de Pearson dos dados de fitopigmentos obtidos pelas duas formas (escala logarítmica).



	mar -97	jun- 97	set- 97	dez- 97	fev- 98	mai- 98	ago- 98	nov- 98	fev- 99	abr- 99	jul- 99	out- 99	fev- 00	mai- 00	ago- 00	out- 00	mar -01	out- 01	fev- 02	set- 02	mar -03	set- 03	mar -04	set- 04	mar -05	set- 05	set- 06	fev- 07	set- 07	fev- 08	set- 08	abr- 09	set- 09
cl_a (mg/m3)	1,7	3,0	4,5	1,6	1,1	1,4	11,9	1,0	3,3	2,5	4,3	1,0	1,4	5,6	5,2	1,5	3,4	1,2	1,3	1,9	3,1	25,3	1,3	3,2	3,4	5,2	1,7	1,8	2,6	1,7	1,8	6,4	2,2

Fig. 1. Séries temporais de clorofila a (Cl_a) em mg/m³, determinada para alguns pontos de amostragem do estuário do Tejo, durante o período de Março de 1997 a Setembro de 2009 (representado em abissas). Na série correspondente ao ponto TE7 também está representada a tabela de dados para visualização dos dias de amostragem (Fonte da imagem: NASA, 2016).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De todos os dias do periodo do programa VQM considerado, obtiveram-se 20 com imagens válidas no "Ocean Color Web". Destas imagens só 10, desde Março de 2001, tinham contornos aceitáveis para o estuário do Tejo. No entanto, nem todas as estações de amostragem serviram para "match-points", dado que algumas foram consideradas pelas imagens satélite como estando localizadas em terra. Tal situação deu-se nas estações situadas mais a montante (TE1A e TE6) e nas estações localizadas nos esteiros da margem sul (TE89, TE90, TE91 e TE92).

Na figura 2 comparam-se as imagens obtidas pelos diferentes sensores, no dia 26 de Setembro de 2006. Como se pode observar, os sensores seawifs e Modis Terra não permitiram a obtenção de imagens com contornos aceitáveis para o estuário do Tejo, para este dia. De facto, com o SeaWiFS nunca foi possível obter uma imagem com resolução adequada para a área do estuário do Tejo. Quanto ao MODIS TERRA, das poucas vezes em que isso foi possível, não havia estações de amostragem com pixeis de valores válidos. Tal deveu-se ao ângulo de varrimento captado que levou sempre à obtenção de imagens distorcidas.

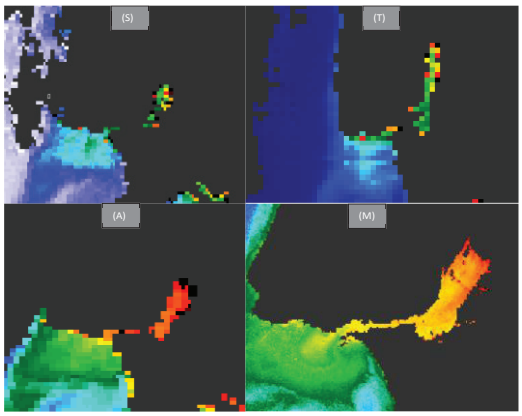


Fig. 2: Imagens de concentração de clorofila a, no estuário do Tejo, obtidas através dos diferentes sensores no dia 26 de Setembro de 2006: Seawifs (S); Modis Terra (T); Modis Aqua (A); e Meris (M). As imagens foram reprojectadas para o sistema de coordenadas WGS 84.

Apenas o MODIS AQUA e o MERIS, que tem melhor resolução (ver tabela I), possibilitaram a obtenção de dados de clorofila a para as três estações que não foram consideradas como estando localizadas em terra (e.g., TE3, em Cacilhas, TE7, no Canal do Barreiro e TE5, na Barra Sul). No entanto, como só foram obtidos dois "match-points" com imagens MERIS, só com os dados MODIS AQUA é que foi possivel obter dados suficientes de clorofila a para comparação com os dados obtidos no âmbito da campanha VQM, correspondendo a 7 "match-points", em 4 dias (tabela II).

Tabela II: Ficheiros de dados importados do "Ocean Color Web" (NASA, s.d.), e dados de clorofila a obtidos por satélite (Cl_a_sat) e por amostragem VQM (Cl_a_VQM) para os possíveis "match-points".

Datas	Sensor	Ficheiro	Estação	Cl_a_sat. (mg/m^3)	Cl_a_VQM (mg/m^3)
21-3-03	MODIS AQUA	A2003079131000.L2_LAC_OC	TE3	13	3,3
21-3-03	MODIS AQUA	A2003079131000.L2_LAC_OC	TE5	4,2	3,7
26-9-06	MODIS AQUA	A2006269141500.L2_LAC_OC	TE7	12	1,7
26-9-06	MERIS	M2006269105607.L2_FRS_OC	TE3	4,6	2,0
26-9-06	MERIS	M2006269105607.L2_FRS_OC	TE7	7,3	1,7
26-2-07	MODIS AQUA	A2007057141000.L2_LAC_OC	TE3	26	1,4
26-2-07	MODIS AQUA	A2007057141000.L2_LAC_OC	TE7	22	1,8
1-4-09	MODIS AQUA	A2009091134500.L2_LAC_OC	TE3	13	1,6
1-4-09	MODIS AQUA	A2009091134500.L2_LAC_OC	TE5	3,5	3,2

Como se pode verificar pela análise dos dados constantes na tabela II verifica-se que o algoritmo, OC3, utilisado nos produtos MODIS, leva a uma sobrestimação dos valores de clorofila a no interior do estuário do Tejo. De facto, o OC3 foi desenvolvido para águas caso 1, não sendo aplicável para a quantificação de clorofila a no estuário Tejo, representado por águas caso 2 (Mota, 2012). No entanto, através da correlação dos "match-points" obtém-se um coeficiente de correlação razoável ($r=0,79$; $p<0,05$). Assim, embora não permitam uma análise quantitativa, os produtos resultantes da aplicação do algoritmo OC3 aos dados de reflectância obtidos pelo MODIS podem permitir uma análise qualitativa nas variações sazonais de clorofila a no estuário do Tejo.

4. CONCLUSÕES

Dados históricos de concentrações de fitopigmentos no estuário do Tejo, foram analisados e utilizados como "match-points" para validação de dados de clorofila a obtidos, através de imagens satélite de cor. Pretende-se, com esses dados, completar séries temporais resultantes das campanhas de amostragem, para análise de variações sazonais no desenvolvimento fitoplantónico.

De uma série de 41 dias de amostragem, compreendidos entre Setembro de 1997 e Setembro do 2009, apenas 4 dias continham "match-points" válidos que foram comparados com dados de clorofila a, estimados a partir de imagens MODIS, através do algoritmo OC3. Este algoritmo foi desenvolvido para águas caso 1, sem a presença significativa de outros componentes responsáveis pela cor do oceano, tais como o CDOM e os sedimentos inorgânicos. No estuário do Tejo o contributo destes componentes para a cor detectada pelo sensor pode ser significativo. Como resultado, o algoritmo conduziu a uma sobrestimação dos valores de clorofila a, verificada através da comparação com os dados resultantes das campanhas de monitorização. No entanto, os "match-points mostraram uma correlação razoável entre si ($r=0,79$; $p<0,05$). Assim, apesar de não permitir uma análise quantitativa, parece que os dados de clorofila a, obtidos através de imagens MODIS poderão permitir uma análise qualitativa das variações históricas de fitoplâncton.

Agradecimentos

Os autores pretendem exprimir o seu profundo agradecimento ao Comandante Pires Vicente, (Divisão de Oceanografia do IH) e à Doutora Carolina Sá (Instituto de Oceanografia) pela inteira disponibilidade para aconselhamento e transmissão de conhecimento.

REFERÊNCIAS

Blondeau-Patissier, D., Gower, J. F. R, Dekker, A. G, Phinn, S. R. e Brando, V. E. (2014). A Review of Ocean Color Remote Sensing Methods and Statistical Techniques for the Detection, Mapping and Analysis of Phytoplankton Blooms in Coastal and Open Oceans. *Progress in Oceanography*, 123, 123-144.

CE (2000). Directiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, L 327, 1.

Martin, S. (2014). *An Introduction to Ocean Remote Sensing*. Cambridge University Press. 476 pp.

Mota, E. M. A. (2012). *O Projeto CoastColour: novos produtos MERIS e sua validação com dados do Estuário do Tejo*. Dissertação de Mestrado em Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica. Universidade do Porto. 90 pp.

NASA (s.d.) *Level-1 and Level-2 Scene Browser* Ocean Color Web. •. http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=am. Consultado no periodo compreendido entre 5/5/2016 e 8/5/2016.

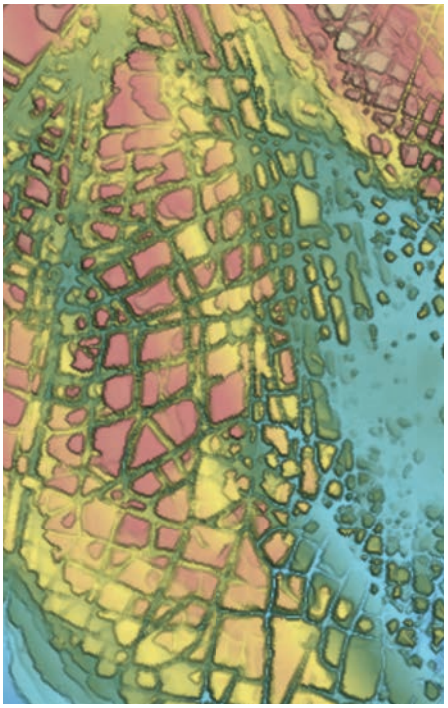
Sá, C., da Silva, J., Oliveira, P. B. e Brotas, V. (2008). *Comparison of MERIS (algal_1 and algal_2) and MODIS (OC3M) Chlorophyll Products and Validation with HPLC in situ Data Collected off the Western Iberian Peninsula*. Proceedings of the "2nd MERIS/(A)ATSR User Workshop", Frascati, Italy.

Valença, M., Cardoso, A., Borges, C., Palma, C. e Santos, P. (2011). REL.TF.QP 07/11. Vigilância da Qualidade do Meio Marinho – 25 Anos de Estudo. Instituto Hidrográfico. 105 pp.

GEOLOGIA MARINHA

4as JORNADAS DE ENGENHARIA HIDROGRÁFICA

21, 22 E 23 DE JUNHO DE 2016



Parâmetros geofísicos dos sedimentos superficiais da desembocadura do rio Tejo

A. Oliveira (1), S. Moreira (1), N. Lapa (1), A. I. Santos (1), R. Santos (1), J. Pombo (1) e J. Duarte (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49 1249-093 Lisboa. anabela.oliveira@hidrografico.pt.

Resumo: Este trabalho pretende correlacionar os dados adquiridos com dois sensores geofísicos (suscetibilidade magnética e velocidade de propagação das ondas P) com os parâmetros geológicos e sedimentológicos (textura, densidade aparente, teor em água e composição) de amostras superficiais colhidas na desembocadura do rio Tejo, durante o cruzeiro SEDEX2015 (9-13 Novembro 2015). Estas amostras exibem uma grande variedade textural que se reflecte nos valores de velocidade de propagação das ondas P, a qual, oscila entre 1813 m/s (areias médias) e 1494 m/s (lodos fluídos). Em presença de areias grosseiras a muito grosseiras esta velocidade apresenta valores baixos e erráticos que estão associados à sua grande porosidade e resultante perda de água durante a colheita. Por sua vez, os valores de suscetibilidade magnética de superfície variam entre $78x10^{-5}$ SI e $0,7x10^{-5}$ SI e os em anel (diâmetro 100mm) entre $68x10^{-5}$ SI e $1,6x10^{-5}$ SI. Estes resultados foram posteriomente aplicados a testemunhos verticais (boxcorers) com o objetivo de identificar interfaces e variações texturais e composicionais, em depósitos marinhos recolhidos na plataforma continental, ao largo de Lisboa.

Palavras-chave: sedimentos, suscetibilidade magnética, ondas p, densidade, granulometria, rio Tejo.

1. INTRODUÇÃO

O estuário do Tejo é o segundo mais extenso da Europa, com cerca de ~325 km^2 de área total. É um sistema mesotidal (variação média de altura da maré de 2,2 m), com período semi-diurno (12 h 25 min). A maré é o fator forçador dominante da dinâmica sedimentar ao promover a redistribuição dos sedimentos em suspensão trazidos pelo rio. A agitação marítima de geração local (ventos do quadrante N) é também um fator importante, principalmente para a manutenção das praias e restingas da margem sul (Freire *et al*., 2006).

Os sedimentos do estuário do Tejo apresentam uma grande riqueza textural e composicional dada a diversidade de ambientes deposicionais. Estes ambientes vão desde os canais e bancos predominantemente arenosos até aos sapais e rasos de maré, presentes nas margens do rio, onde domina a componente silto-argilosa.

As propriedades geofísicas dos sedimentos marinhos estão diretamente relacionados com o tamanho das partículas, porosidade, densidade e composição do sedimento. Numerosos estudos como, por exemplo, Ayres & Theilen (1999) mostram a relação direta entre a velocidade das ondas P (V_P), a porosidade e a densidade. Em geral, há uma tendência para o aumento da V_p com o decréscimo da porosidade e consequente aumento da densidade. A suscetibilidade magnética (SM) é uma propriedade inerente às rochas e minerais, ou seja, está diretamente relacionada com a composição do sedimento, mas também com a dimensão das partículas, constituindo uma grandeza adimensional. Nos minerais, o magnetismo está associado à quantidade de ferro, cobalto e níquel presente na sua estrutura e é também afetado pela estrutura química das moléculas individuais (Silberberg, 1998). Assim, temos 3 classes principais de comportamento magnético. Os minerais ferromagnéticos, como a magnetite, maghemite (forma magnética de hematite), goethite, pirrotite, que têm uma magnetização espontânea mesmo na ausência de um campo externo. Os minerais paramagnéticos, como a pirite, as argilas ricas em ferro (clorite, esmectite e ilite), a siderite, as piroxenas e as anfíbolas, que têm SM positiva (com ordens de grandeza entre 10^{-5} e 10^{-3} SI) e, os diamagnéticos, como o quartzo e a calcite, que adquirem suscetibilidade magnética negativa fraca (da ordem dos 10^{-6} SI) quando expostos a um campo magnético induzido (Ellwood *et al*., 2006).

Este trabalho visa compreender a relação existente entre algumas características sedimentológicas dos sedimentos superficiais recolhidos do canal de saída e da margem norte do estuário do Tejo (textura, densidade aparente, teor em água e composição) e duas propriedades geofísicas medidas nesses sedimentos (velocidade de propagação das ondas P e suscetibilidade magnética).

2. MÉTODOS

Para este estudo foram utilizadas 11 amostras superficiais colhidas na desembocadura do rio Tejo (fig.1), em dois períodos de maré diferentes (vazante-$_{vaz}$ e em enchente-$_{ench}$), e 10 amostras em

estação fixa (posição 1, na fig.1), durante o cruzeiro SEDEX2015 (9-13 Novembro 2015), a bordo do "NRP Andrómeda". Para a colheita dos sedimentos utilizou-se uma draga Smith-McIntyre onde foram enterrados, na vertical, dois tubos de PVC de 76 mm de diâmetro e 250 mm de comprimento (mini-core) para preservação da estrutura sedimentar e análises geofísicas posteriores.

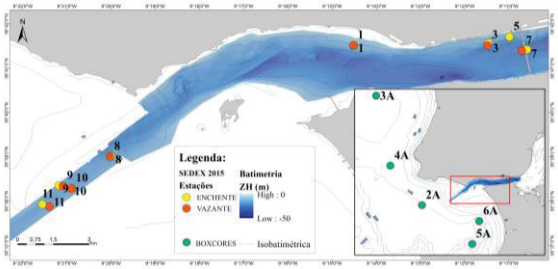


Fig. 1. Localização dos pontos de amostragem, realizados no rio Tejo e na plataforma adjacente (quadrado do lado direito).

Em laboratório efetuou-se a medição da velocidade das ondas P utilizando um equipamento portátil Pundit Lab, calibrado entre cada amostra com um padrão conhecido. Foram feitas 3 medições na zona central do mini-core, acoplando os dois transdutores às paredes laterais de modo a formar uma linha reta entre eles.

Em termos matemáticos a suscetibilidade magnética em volume ($_K$) é definida como a razão entre a magnetização induzida por unidade de volume da amostra medida ($_M$) e o campo de intensidade magnética aplicada ($_H$).

A suscetibilidade magnética de volume (SM) foi medida usando dois tipos de sensores Bartington: sensor de superfície (MS2E) e sensor anelar (MS2C) de diâmetro 100 mm. Em ambos, e antes das medições o sensor é calibrado com uma amostra padrão. Na medição de superfície foram feitas 3 a 4 medições por amostra, no topo e lateral do mini-core, com um desvio limite de 5 %. A cada duas medições o sensor era colocado a zero, para evitar a derivação dos valores obtidos. A medição em anel foi feita do topo para a base do mini-core, com um intervalo de 1 cm, sendo aplicadas, aos valores registados, correções relativas ao diâmetro do core e deriva no *software* MULTISUS.

A densidade aparente é definida pela equação:

$$\rho = m/V$$

Onde ρ é a densidade aparente (g/cm^3), m é a massa da amostra e V é o seu volume. Para a sua determinação foi utilizado um anel metálico de volume conhecido, o qual foi cravado na amostra até o preencher totalmente. Este procedimento foi efetuado na superfície de cada mini-core, correspondendo aos dois primeiros centímetros da amostra.

A textura do sedimento foi determinada por difração laser (Malvern 2000) para as partículas com dimensões abaixo de 500 µm e, por peneiração, para partículas com dimensão acima dos 500 µm.

Os sedimentos foram classificados usando o sistema de Shepard (1954) e Udden-Wentworth (Wentworth, 1922).

Para validação dos resultados obtidos, utilizaram-se cinco box-core (de ~60 cm) colhidos nos depósitos lodosos da plataforma média adjacente ao rio Tejo (2A e 4A), do Mar da Ericeira (3A) e da cabeceira do canhão submarino de Lisboa (5A e 6A). Estes box-core foram colhidos entre 11 e 12 de Junho de 2015, a bordo do "NRP Gago Coutinho" (fig.1).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da relação entre os valores das propriedades físicas encontradas nos mini-corers e as respetivas caraterísticas sedimentares das amostras, permitiu identificar 6 tipos de sedimentos (Tabela I):

Tabela I. Valores mínimos (min), máximos (max), media (md) e desvio-padrão (dp) das velocidades das ondas p, para cada tipo de sedimento identificado.

V_P (m/s)				
Tipo de sedimento	min	max	md	dp
Areia grosseira (sem saturação com H_2O salgada)	1193	1292	1239	43
Areia média	1813	1809	1816	5
Areia fina siltosa	1540	1681	1608	49
Areia silte argila	1508	1688	1605	75
Silte arenoso	-	-	1612	-
Silte argiloso (fluido)	1494	1559	1526	26

Tabela II. Valores mínimos (min), máximos (max), media (md) e desvio-padrão (dp) das densidade e teor em água, para cada tipo de sedimento identificado.

Densidade aparente (g/m^3)					Teor em água (%)			
Tipo de sedimento	min	max	md	dp	min	max	md	dp
Areia grosseira	1,65	1,96	1,77	0,13	5	18	13	5,0
Areia média	1,83	1,90	1,87	0,05	21	24	25	4,7
Areia fina siltosa	1,67	1,89	1,80	0,07	44	56	54	9,8
Areia silte argila	1,54	1,79	1,69	0,11	49	94	72	20
Silte arenoso	-	-	1,69	-	-	-	72	-
Silte argiloso (fluido)	1,5	1,7	1,5	0,1	77	126	93	23

A variação dos valores de velocidade das ondas P observados (Tabela I) estão de acordo com Bukingham (2005), ou seja, a um aumento da dimensão das partículas corresponde um aumento nos valores da velocidade das ondas P, com exceção das areias grosseiras que apresentaram valores

baixos e erráticos. Neste caso, durante a colheita da amostra, a água salgada drenou totalmente passando a existir ar entre as partículas (menor teor em água, ver Tabela II e fig.2) o que provocou uma atenuação do sinal.

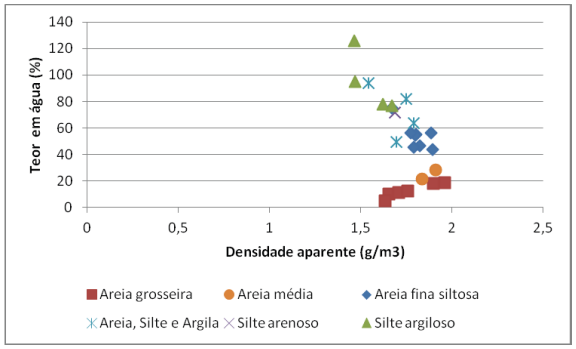


Fig. 2. Relação entre a densidade aparente (g/m^3) e o teor em água (%) das amostras colhidas durante o cruzeiro SEDEX2015.

Os sedimentos da margem norte do Tejo (classificados como silte argiloso, silte arenoso e areia silte argila), com altos teores de matéria orgânica, de argila (18-27 %) e de teor em água (49-126 %), apresentam densidades aparentes baixas, da ordem dos 1,5-1,69 g/m^3. Os sedimentos do canal, mais grosseiros, classificados como areias grosseiras e areias médias, apresentam densidades aparentes tendencialmente mais elevadas, com teores em água baixos (fig.2).

Os valores de SM de superfície e anelares observados são muito aproximados (Tabela III), evidenciando o mesmo tipo de comportamento em presença do mesmo material.

Tabela III. Valores mínimos, máximos, media e desvio-padrão das SM encontradas para cada tipo de sedimento identificado.

	SM superfície (x10^{-5} SI)				SM anelar (x10^{-5} SI)			
Tipo de sed.	min	max	md	dp	min	max	md	dp
Areia grosseira	0,7	3,5	1,6	1,5	1,6	3,0	2,4	0,5
Areia média	5,0	6,0	5,5	0,7	6,1	11,5	8,8	3,8
Areia fina siltosa	36,0	78,0	49,0	17	27	68,0	46,0	15,5
Areia silte argila	30,0	38,0	34,0	3,7	15,5	40,5	26,8	10,4
Silte arenoso	-	-	22,0	-	-	-	96,4	-
Silte argiloso (fluido)	15,5	50,0	37,0	20,0	21,2	47,3	32,8	11,4

As areias grosseiras apresentam os valores mais baixos de SM, relacionados com o predomínio de grãos de quartzo e restos de conchas. À medida que a componente de areia fina e silte aumenta os valores de SM também aumentam. Os valores máximos são atingidos na areia fina siltosa e silte arenoso o que poderá estar relacionado com a presença de minerais pesados. Os valores diminuem no caso do silte argiloso fluido (15- 47x10^{-5}), o que provavelmente estará relacionado com a menor quantidade de minerais magnéticos na fração argilosa.

A integração e a aplicação destes resultados permitiu observar a grande homogeneidade vertical de cinco box-cores (fig.3 e fig.4), os quais são constituídos essencialmente por sedimentos siltosos (>50 % de silte) contendo pequenas variações texturais no conteúdo em areia fina e argila (intercalações de silte arenoso ou de silte argiloso). No geral, mostram uma tendência para o aumento da velocidade das ondas P para a base (exceto no caso do box-core 4A, que é mais grosseiro à superfície), correspondendo a um aumento da densidade e da compactação das partículas (diminuição da porosidade) e também a um ligeiro aumento da dimensão das partículas. Em termos de SM, as variações observadas na vertical são também pequenas, mas com comportamentos diferenciados entre box-cores. A SM é mais baixa nos box-cores 2A e 3A e aumenta para os box-cores 4A, 5A e 6A. Estes valores sugerem a existência de pequenas variações composicionais (aumento do conteúdo em quartzo) e texturais (aumento da componente areia fina), as quais, se situam principalmente na base dos box-cores.

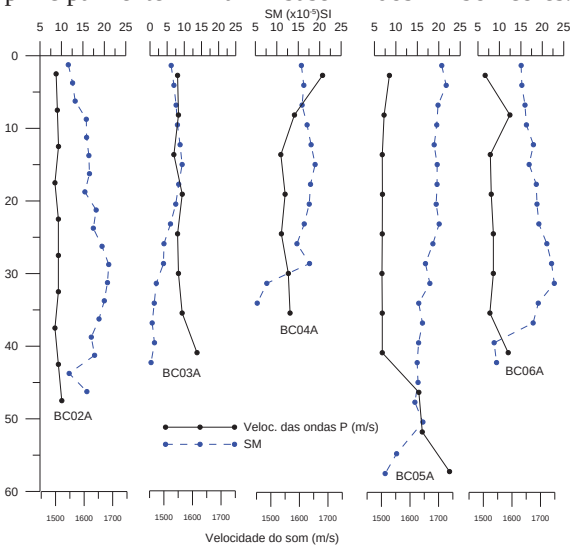


Fig. 3. Suscetibilidade magnética (x10^{-5}SI) e velocidade das ondas P (m/s) observadas em cinco box-cores colhidos nos depósitos lodosos da plataforma continental e cabeceira do canhão submarino de Lisboa.

4. CONCLUSÕES

Com base nas suas propriedades sedimentares e geofísicas os sedimentos da margem norte do Tejo foram classificados em 4 grupos: silte argiloso (est.3$_{vaz.}$ e est.5), silte arenoso (est.8), areia silte e argila (est. 7, 3$_{ench.}$, 1) e areia fina siltosa e silte arenoso que se encontrou maioritariamente na est.1$_{fixa.}$. O sedimento recolhido nas estações do canal corresponde maioritariamente a areia grosseira (est.8, 9, 10) e média (est.11).

A aplicação destas propriedades a testemunhos verticais (box-cores) possibilitou verificar a grande homogeneidade dos primeiros 40 a 60 cm da coluna sedimentar amostrada, a qual, é maioritariamente constituida por sedimentos silto-argilosos com bioturbação (ver macrofauna bentica na fig.4). Contudo, a partir dos 35 a 40 cm de profundidade, verificou-se um aumento do grau de compactação dos sedimentos, ao qual se associa um pequeno incremento da componente arenosa rica em quartzo (aumento da V_P e decréscimo dos valores de SM, para a base).

A aplicação destas propriedades permitiu ainda observar que os sedimentos do box-core 4A são ligeiramente mais grosseiros à superficie quando comparados com os sedimentos homólogos recolhidos nos outros box-cores. A presença deste tipo de sedimento é testemunhado pelo comportamento diferenciado da V_P.

Agradecimentos

Agradece-se ao Comandante e tripulação do "NRP Alm. Gago Coutinho" toda a ajuda prestada na *delicada manobra* de colheita de amostras com box-corers.

No decurso do cruzeiro SEDEX2015, agradece-se também ao Comandante, tripulação do "NRP Andrómeda" e restante pessoal técnico, bolseiros e alunos da FCUL (Mestrado em Ciências o Mar) embarcados, a ajuda na colheita e preservação das amostras de sedimentos.

REFERÊNCIAS

Buckingham M. J. (2005). Compressional and shear wave properties of marine sediments: comparisons between theory and data. *Journal of Acoustic Society of America*, 117(1): 137–152.

Ellwood, B., Balsam, W. e Roberts, H. (2006). Gulf of Mexico sediment sources and sediment transport trends from magnetic susceptibility measurements of surface samples. *Marine Geology*, 230: 237–248.

Freire, P., Taborda, R., Andrade, C. (2006). Caracterização das praias estuarinas do Tejo. *Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos*, disponível em: http://www-ext.lnec.pt/LNEC/bibliografia/DHA/freire-et-al%2006.pdf

Silberberg, M. (1998). Chemistry: The molecular nature of matter and change: McGraw-Hill Book Companies, New York.



Fig. 4. Fotos dos sedimentos silto-argilosos, colhidos com o box-corer, a bordo do "NRP Gago Coutinho"; a) e b) panelão com a amostragem verticais (4 tubos de PVC); c) d) e e) macrofauna bêntica encontrada; Anelídeos (poliquetas); Priapulida (Penis worm) e Molusco bivalve (Pinna fragilis), responsáveis pela bioturbação do sedimento.

Chemical composition of submarine degassing areas in São Miguel Island (Azores archipelago)

L. Moreno (1), F. Viveiros (1), R. Couto (2), C. Silva (1,3), P. Range (4), D. Geraldes (5,6), J. E. Pacheco (1,3)

(1) Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores. Lucia.M.Rodriguez@azores.gov.pt.

(2) cE3c - ABG - Center for Ecology, Evolution and Environmental Changes and Azorean Biodiversity Group, Department of Biology, Universidade dos Açores.

(3) Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores, Universidade dos Açores.

(4) Department of Biological & Environmental Sciences, College of Arts and Sciences, Qatar University.

(5) CCMAR - Centro de Ciências Marinhas, Universidade do Algarve.

(6) CIBIO - Açores, Centro de Investigação em Biodiversidade e Recursos Genéticos.

Abstract: Several secondary manifestations of volcanism are found in the Azores archipelago including subaerial and submarine hydrothermal fumaroles. This work shows the chemical composition of some submarine degassing vents located offshore of São Miguel Island, namely close to Porto Formoso, Ribeira Quente and Mosteiros villages. The samples were collected during the summers of 2013 and 2014 and spring of 2015. Analytical procedures included gas chromatography for the gases in the headspace of the Giggenbach bottles (CH_4, N_2, O_2, Ar, He and H_2) and titration for those dissolved in the alkaline solution (CO_2 and H_2S). The dry phase is dominated by CO_2 with more than 99 molar%. N_2, O_2 and Ar are also detected in minor amounts in all the samples, whereas H_2S and H_2 are present only in some of them. Characterization of these degassing emissions is important to identify and quantify the gases emitted and to identify future signals of volcanic activity.

Key words: Volcanism, submarine degassing vents, chemical composition, São Miguel Island, Azores archipelago, volcanic gases.

1. INTRODUCTION

The Azores archipelago is located in the middle of the North Atlantic Ocean where the American, Nubian and Eurasian lithospheric plates meet (Searle, 1980) (Fig. 1). This archipelago, formed by nine volcanic islands, has been affected by seismic and volcanic activity as a result of its complex geological setting. Nowadays, in some of the islands, is manifested by hydrothermal manifestations characterized by low temperature fumaroles, steaming grounds, soil diffuse degassing areas, thermal and cold CO_2-rich springs.

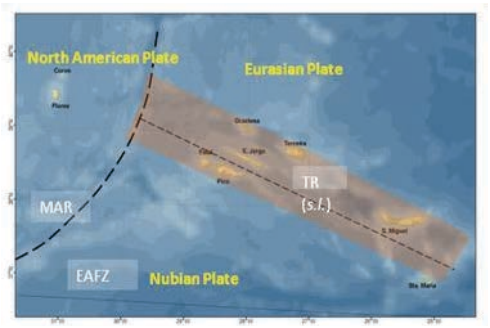


Fig. 1. Localization of the Azores archipelago with the main tectonic structures (adapted from Hipólito et al. 2010).

São Miguel is the largest island of the Azores. There are three dormant central volcanoes on the island: Sete Cidades at the western end of the island, Fogo which lies in the central part of the island and, further to the east, Furnas (Fig. 2). The submarine degassing vents discussed in this study are associated with these three volcanoes. The most important secondary manifestations of Sete Cidades Volcano are restricted to submarine thermal springs in Ponta da Ferraria and Mosteiros beach, as well as diffuse degassing areas (Viveiros *et al.*, 2015). Submarine degassing vents of Mosteiros are located in the NW flank of Sete Cidades Volcano. At Fogo Volcano several hydrothermal manifestations such as fumarolic fields, thermal and cold CO_2-rich springs and soil diffuse degassing areas are found out. The submarine gas vents of Porto Formoso are located in the N flank of this volcano. Submarine fumaroles of Ribeira Quente are located in the S flank of Furnas Volcano, where secondary manifestations of volcanism are also characterized by fumaroles, steaming ground, thermal springs, cold CO_2-rich and diffuse degassing areas (Ferreira *et al.*, 2005; Viveiros *et al.*, 2010).

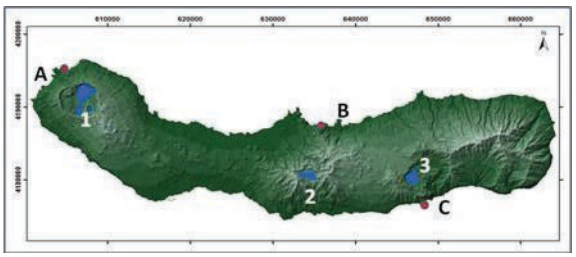


Fig. 2. DEM of São Miguel Island: 1-Sete Cidades, 2- Fogo, 3-Furnas volcanoes; A- Mosteiros, B- Porto Formoso, C- Ribeira Quente submarine gas vents.

2. SAMPLING AND ANALYTICAL METHODOLOGY

Gas samples were collected at the sea bottom by using pre-vacuum Giggenbach bottles filled with NaOH 4N. The bottles were connected to an inverted funnel over the vent to catch and transfer the gas into the bottle (Giggenbach and Goguel, 1989) (Fig. 3).

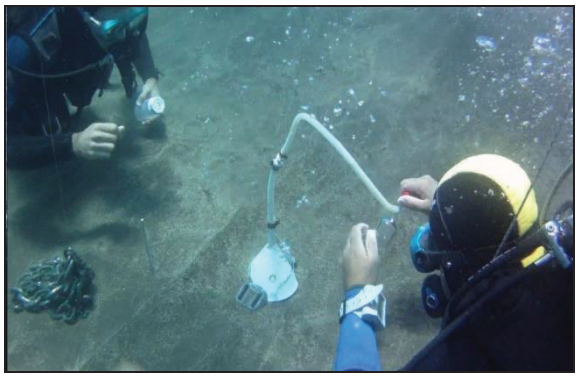


Fig. 3. Collection of gases during the surveys carried out at Ribeira Quente submarine fumaroles.

Analysis of the gas samples were made in the laboratory of gas geochemistry of the University of the Azores. The gases in the headspace of the bottle (CH_4, N_2, O_2, Ar, He and H_2) were analysed by gas chromatography. Samples collected in Porto Formoso and Ribeira Quente were analysed with a Perkin Elmer Autosystem XL gas chromatograph equipped with a Thermal Conductivity Detector and MS packed column. He was used as a carrier gas for the Porto Formoso samples while in the case of Ribeira Quente samples, besides He, also Ar was used as a carrier gas. Gases from submarine vents of Mosteiros were analysed with a Perkin Elmer Clarus 580 gas chromatograph. This gas chromatograph has two channels equipped with two Thermal Conductivity Detectors and a MS 5A plot column and a MS packed column that allow using He and Ar as carrier gases to quantify separately Ar and O_2. Gases dissolved in the alkaline suspension (CO_2 and H_2S) were analysed by titration: CO_2 by potentiometric titration with an automatic titrator from Radiometer Copenhagen, model VIT90 Video Titrator and colorimetric titration with mercury acetate using dithizone for end point detection is used for the quantification of H_2S.

3. RESULTS

The available data show that the most abundant dry gas in these submarine degassing vents is CO_2 with more than 99 molar%. N_2, O_2, Ar and CH_4 are also detected in minor amounts in all the samples. H_2S and H_2 were only detected in Ribeira Quente. All the results are shown in Table I (See next page). Differences between gas compositions are easier exposed using ratios that are very useful in seismovolcanic monitoring to evaluate the existence of equilibrium conditions on the reservoirs that feed these gas emissions and identify possible deviations that may indicate unrest periods. Some significant gas ratios are shown in Table II.

Table II. Gas ratios for the different submarine gas vents.

Submarine Vent	CO_2/CH_4	N_2/O_2+Ar	CO_2/N_2
Porto Formoso	2583204.1	5.5	4182.8
Ribeira Quente	6992.8	4.4	467.9
Mosteiros	87546.2	3.2	524.0

4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Gas sampling methodologies typically applied in the Azores archipelago to sample the inland fumarolic emissions were adapted recently to collect the gases emitted in the submarine vents. The methodologies applied and the results showed in this work confirm that this methodology seems to be appropriate to characterize these degassing areas. Ribeira Quente degassing area is dominated by CO_2 and shows a typical hydrothermal composition with the presence of H_2S, CH_4 and H_2. The emissions of Porto Formoso and Mosteiros are also dominated by the presence of CO_2, however H_2S and H_2 are absent, suggesting that these degassing vents may be the prolongation of the diffuse degassing areas identified inland, close to the sampled sites. This work also shows some gas ratios that can be used to characterize the sampled submarine degassing sites. The gas ratio CO_2/CH_4 has been used in the literature as an important indicator of unrest periods (Chiodini *et al.*, 2009). CO_2/N_2 ratio was used by Arnórsson (1987) as a geothermometer and for this reason this gas ratio is also presented here. N_2/O_2+Ar is a good indicator of air contamination as the typical ratio for atmospheric air is about 3.6. Additional gas sampling is necessary in order to confirm the stability of the presented gas ratio and evaluate the existence of potential variability. Characterization of the degassing areas is very important to identify and quantify the gases emitted. These results are important for any seismovolcanic monitoring

programme in order to recognize the baseline behaviour of the volcanic systems and eventually contribute to identify future signals of volcanic activity. In that way more research in the offshore environments close to the islands should be carried out to try to discover also the existence of more submarine degassing vents in other sites.

Table I. Gas composition of Porto Formoso, Ribeira Quente and Mosteiros representative samples. Legend: n.d. – not detected; a) – not detected due to technical limitations; b) – technical limitations did not allow separate detection of Ar and O_2; c) not detected because new gas chromatograph allows separate detection of Ar and O_2.

Submarine Vent	Sampling date	CO_2 (molar%)	H_2S (molar%)	CH_4 (molar%)	H_2 (molar%)	He (molar%)	N_2 (molar%)	O_2+Ar (molar%)	O_2 (molar%)	Ar (molar%)	Gas chromatograph	Carrier Gas
Porto Formoso	08-07-2013	99.97	n.d.	0.00004	n.d.	a)	0.02	0.0043	b)	b)	Perkin Elmer Autosystem XL	He
Ribeira Quente	06-07-2014	99.59	0,095	0.01424	0.04	0.001	0.21	0.0484	b)	b)	Perkin Elmer Autosystem XL	He and Ar
Mosteiros	21-04-2015	99.75	n.d.	0.00114	n.d.	0.001	0.19	c)	0.005	0.06	Perkin Elmer Clarus 580	He and Ar

Acknowledgements

This work was funded by an FCT exploratory grant (MOFETA - EXPL/MAR-EST/0604/2013). We wish to thank to all the MOFETA team that collected the gas samples and to CVARG and CIVISA, for the possibility to present this work in *4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*.

REFERENCES

Arnórsson, S. (1987). Gas chemistry of the Krísuvík geothermal field, Iceland, with special reference to evaluation of steam condensation in upflow zones. *Jökull*, 37, 31-47.

Chiodini, G. (2009). CO_2/CH_4 ratio in fumaroles a powerful tool to detect magma degassing episodes at quiescent volcanoes. *Geophysical Research Letters*, 36, L02302.

Ferreira, T., Gaspar, J.L., Viveiros, F., Marcos, M., Faria, C., Sousa, F. (2005). Monitoring of fumarole discharge and CO_2 soil degassing in the Azores: contribution to volcanic surveillance and public health risk assessment. *Annals of Geophysics*, 48 (4-5), 787-796.

Giggenbach, W.F., Goguel, R.L. (1989). Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas samples. *DSIR New Zealand, Report No. CD 2387*, 53.

Hipólito, A., Madeira, J., Gaspar, J., Carmo, R. (2010). Structural Geology of Graciosa Island – a contribution for the geodynamics of the Azores triple junction. *Geophysical Research Abstracts*, 12, 9078.

Searle, R. (1980). Tectonic pattern of the Azores spreading centre and triple junction. *Earth & Planetary Science Letters*, 51, 415- 434.

Viveiros, F. (2010*). Soil CO_2 flux variations at Furnas Volcano (São Miguel Island, Azores)*. Ph.D. Thesis on Geology, especiality Volcanology, University of the Azores, 266p.

Viveiros, F., Gaspar, J.L., Ferreira, T., Silva, C., Marcos, M., Hipólito, A. (2015). Mapping of soil CO_2 diffuse degassing at São Miguel Island and its public health implications. In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (eds.) *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*, Geological Society of London Memoir, 44, 185-195.

Volcanic gas emissions offshore of São Miguel and Faial islands (Azores archipelago)

F. Viveiros (1), L. Moreno (1), M. Carreiro-Silva (2, 3), R. Couto (4), C. Silva (1, 5), P. Range (6), D. Geraldes (7, 8), H. Parra (2), T. Ferreira (1, 5), and J. Pacheco (1, 5)

(1) Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, Ponta Delgada. maria.fb.viveiros@azores.gov.pt

(2) IMAR - Instituto do Mar & MARE – Marine and Environmental Sciences Centre, Universidade dos Açores, Departamento de Oceanografia e Pescas, Universidade dos Açores

(3) Department of Benthic Resources and Processes, Institute of Marine Research - Bergen

(4) cE3c - ABG - Center for Ecology, Evolution and Environmental Changes and Azorean Biodiversity Group, Department of Biology, Universidade dos Açores

(5) Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores, Universidade dos Açores

(6) Qatar University, Department of Biological & Environmental Sciences

(7) CCMAR - Centro de Ciências Marinhas, Universidade do Algarve

(8) CIBIO - Açores, Centro de Investigação em Biodiversidade e Recursos Genéticos

Abstract: Several gas emissions are found offshore of some of the Azorean islands and represent secondary manifestations of the volcanic nature of the islands. Since 2012 several sampling surveys were performed in the submarine emissions located offshore of Faial and São Miguel islands to characterize the main gas composition and identify eventual variations that can represent eventual unrest of the volcanic systems.

Most of the gas emissions are cold and carbon dioxide is the main gas released in the dry phase (with more than 98 molar%). Hydrogen sulfide and hydrogen were detected only in the emissions located close to Ribeira Quente village (south coast of São Miguel Island) and the sulfuric component is present only when the gas flux is medium to high. These emissions are similar to the inland Furnas Volcano hydrothermal fumaroles. All the gas emissions have variable compositions of nitrogen, oxygen, argon and methane.

Keywords: volcanic gases, submarine gas vents, carbon dioxide, diffuse degassing structures, Azores archipelago.

1. INTRODUCTION

The Azores archipelago is formed by nine volcanic islands located in the North Atlantic Ocean, where the North American, Eurasian and Nubian plates meet. Due to this complex geodynamic setting and the presence of a mantle anomaly, seismic and volcanic activities are frequent in the islands. Since the settlement, in the 15th Century, several destructive earthquakes and at least 28 volcanic eruptions occurred in the archipelago. From these, at least 13 were submarine (Gaspar *et al*., 2015).

Nowadays seismo-volcanic activity is characterized by low magnitude seismicity and by the presence of secondary manifestations of volcanism, such as hydrothermal fumaroles, thermal and cold CO_2-rich springs (Cruz *et al*., 1999; Ferreira *et al*., 2005). In addition to the above mentioned visible manifestations of volcanism, gases may be released permanently and silently from the volcanic soils through fractures and faults. These emissions, named soil diffuse degassing areas, are characterized essentially by the release of carbon dioxide (CO_2) and the radioactive gas radon (^{222}Rn) (Chiodini *et al*., 1998; Viveiros *et al*., 2010; Silva *et al*., 2015). Excluding Santa Maria and Corvo islands, all the other islands have at least one type of visible manifestations of volcanism. Sub-aerial gas emissions have been studied since the early nineties in most of the islands (e.g., Baxter *et al*., 1999; Cruz *et al*., 1999; Ferreira and Oskarsson, 1999). Besides the sub-aerial degassing manifestations, submarine gas emissions were also identified offshore of São Miguel, Terceira, Graciosa, São Jorge and Faial (Viveiros, 2003 and references therein). Sampling surveys started to be done in the submarine emissions located offshore of São Miguel and Faial islands since 2012. This study will show the chemical composition of some of the emissions and discuss the differences observed, as well as the implications for the volcanic monitoring of the Azores volcanoes.

2. STUDY SITES

The areas under study are the submarine emissions located offshore of Faial and São Miguel islands.

2.1. Faial Island

The only visible sub-aerial fumarolic emissions found in Faial Island are located in the Capelo's Peninsula region (Ferreira, 1994) and are associated to the last volcanic eruption that affected the island in 1957-58. These emissions, with main temperatures around 95 ºC, are mainly composed by water vapour and atmospheric gases (N_2 and O_2) (Ferreira, 1994). Soil CO_2 diffuse degassing maps highlighted that the main anomalous CO_2 areas are associated to the main tectonic structures that cross the island with directions WNW-ESE and NW-SE (Marcos, 2006 and references therein; Madeira *et al*., 2015). Highest soil CO_2 concentrations were measured at Praia do Almoxarife (Ferreira and Viveiros, 2007) in the base of the Espalamaca Fault scarp. The submarine emissions under study are located about 500 m offshore of Espalamaca. The water depth in these gas emissions site is about 36 m and correspond to the area where an experimental platform – OceanA-Lab - has been deployed to conduct long-term experimental studies under naturally acified seawater conditions (Carreiro-Silva *et al*., 2015) (Fig. 1).

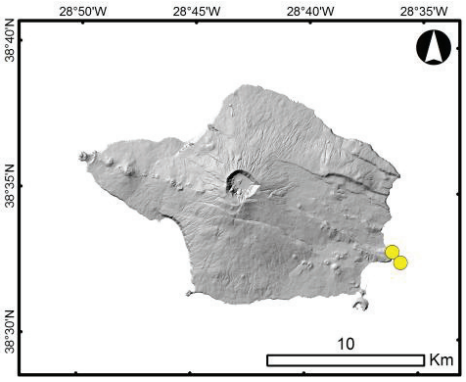


Fig. 1 – Location of the Espalamaca submarine vents close to Faial Island (Azores archipelago).

2.2. São Miguel Island

All the types of secondary manifestations of volcanism mentioned for the Azores archipelago are also found in São Miguel Island. Hydrothermal fumaroles are located (1) in the northern flank of Fogo and (2) inside the caldera and in the south flank of Furnas central volcanoes (Caliro *et al*., 2015). Gases emitted by these fumaroles are mainly water vapour, followed by CO_2. Minor amounts of H_2S, H_2, N_2, Ar, O_2, CH_4 and He have been also measured (Ferreira and Oskarsson, 1999; Caliro *et al*., 2015). Several (CO_2 and ^{222}Rn) soil diffuse degassing areas have been identified in this island not only at Furnas and Fogo central volcanoes (Viveiros *et al*., 2010, 2015; Silva *et al*., 2015), but also in the flanks of Sete Cidades volcano, namely at Mosteiros village (Viveiros *et al*., 2015). Main diffuse degassing structures are correlated to the main WNW-ESE and NW-SE tectonic structures that cross these volcanic systems (Viveiros *et al*., 2010, 2015; Silva *et al*., 2015).

Three submarine degassing areas were sampled in the last years offshore of São Miguel Island (Fig. 2). Site named as "A" is located close to Mosteiros village and samples were collected at about 7 – 9 m depth. This area is located in the flank of Sete Cidades volcanic system. Site referred as "B" is located in the northern flank of Fogo Volcano, close to Porto Formoso village. In the south flank of Furnas Volcano the submarine emissions of Ponta da Lobeira (referred as "C") are located at about 6 m water depth (Fig. 2).

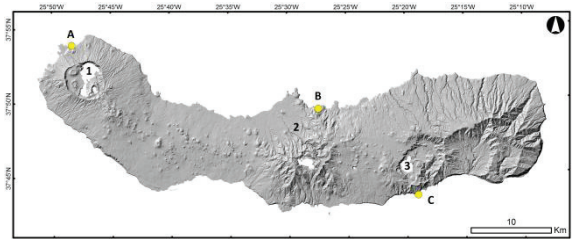


Fig. 2 – Location of the São Miguel submarine vents. References "A", "B" and "C" respect to Mosteiros, Porto Formoso and Ponta da Lobeira (Ribeira Quente) vents. Numbers highlight the three dormant central volcanoes from São Miguel: 1 – Sete Cidades; 2 – Fogo; 3 – Furnas Volcano.

3. GAS SAMPLING AND ANALYTICAL PROCEDURES

Gas samples were collected based on the modified Giggenbach methodology, by using pre-evacuated bottles filled with NaOH 4 N. Gas analyses were performed in the laboratory of gas geochemistry of the Centre for Volcanology and Geological Risks Assessment (CVARG, University of the Azores) using gas chromatography and titration techniques to identify the following volatiles: CO_2, H_2S, N_2, O_2, Ar, He, H_2 and CH_4. For more detailed information about the gas sampling and the analytical procedures see Moreno *et al*. (2016 – *this volume*).

4. RESULTS

Table I shows gas analyses for samples collected between 2013 and 2015 in the different submarine vents of the Azores archipelago. CO_2 is the main gas specie present in the dry phase of all the sampled areas with more than 98 molar%. Nitrogen, oxygen and helium were detected in all samples. Helium was not detected on Porto Formoso samples due to technical limitations. Variable concentrations of methane ($3.87x10^{-5}$ to 0.014 molar%) were detected on São Miguel samples, but not on Faial emissions. The hydrogen and the sulphuric component (H_2S), usually present in hydrothermal fumaroles, were detected only at Ribeira Quente emissions.

5. DISCUSSION

After H_2O, CO_2 is the most abundant volcanic gas. The submarine emissions sampled offshore Faial and São Miguel islands are all dominated by CO_2, similarly to the observed inland (Ferreira and

Oskarsson, 1999; Viveiros *et al*., 2010; Caliro *et al*., 2015). Gas composition of Espalamaca vents seems to represent diffuse degassing areas dominated by CO_2 with minor amounts of N_2, O_2 and He, and without any sulphuric component or methane, which are typical of hydrothermal fumaroles. These submarine emissions are similar to the gases measured at Faial Island, where the only visible emissions are found out at Capelinhos area and also do not show a typical hydrothermal composition (Ferreira, 1994). Espalamaca submarine emissions are located offshore in the direction of Espalamaca fault, and correspond probably to the prolongation of the anomalous soil CO_2 degassing area detected inland in 2007 (Ferreira and Viveiros, 2007). Anomalous soil CO_2 areas were defined in Solfatara (Italy) by Chiodini *et al.* (2001) as diffuse degassing structures (DDS). The Faial submarine vents are probably the continuation of a DDS offshore.

Table I – Gas composition of Faial and São Miguel submarine vents. Legend: b.d.l. – below detection limit; n.d. – not detected (due to technical limitations); (a) – during 2013 and 2014 technical limitations did not allow separation of Ar and O_2.

Chemical components (molar%)	Faial Island	São Miguel Island		
	Espalamaca	Mosteiros	Porto Formoso	Ribeira Quente
	22/05/2015	21/04/2015	08/07/2013	06/07/2014
CO_2	98.17	99.75	99.97	99.59
H_2S	0.000	0.000	0.000	0.095
CH_4	b.d.l.	0.001	$3.87x10^{-5}$	0.014
H_2	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.039
He	0.0200	0.0008	n.d.	0.0011
N_2	1.49	0.19	0.02	0.21
O_2 + Ar	0.057	0.053	0.004	0.048
O_2	0.290	0.055	(a)	(a)
Ar	0.031	0.005	(a)	(a)

Mosteiros and Porto Formoso vents show similar composition as the Espalamaca vents and are probably also the extension of DDS offshore São Miguel Island and are associated, respectively, to the main tectonic structures that cross Sete Cidades and Fogo central volcanoes with main WNW-ESE and NW-SE directions. In the particular case of Mosteiros vents they are located offshore of Mosteiros village, where anomalous soil CO_2 emissions were detected even if no hydrothermal fumaroles were identified (Viveiros *et al*., 2015 and references therein). Porto Formoso vents are placed in the vicinities of cold-CO_2 rich springs, and thus also in agreement with the sub-aerial degassing patterns.

The only submarine vents with typical hydrothermal composition were the ones sampled close to Ribeira Quente village, in the south flank of Furnas Volcano. In these areas, where CO_2 is also the major component, H_2S, H_2 and CH_4 were detected, similarly to the gas compositions measured at the sub-aerial Furnas fumarolic fields (Caliro *et al.*, 2015). Nevertheless the Ribeira Quente submarine vents have lower H_2S concentrations when compared to the sub-aerial fumaroles (Fig. 3).

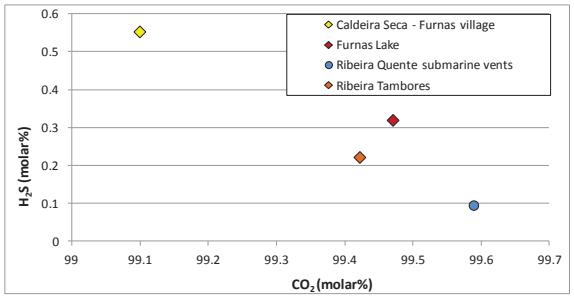


Fig. 3 –CO_2/H_2S relations for both the submarine and sub-aerial emissions of Furnas Volcano fumaroles. Data from the sub-aerial gas emissions were obtained on Caliro et al. (2015).

6. CONCLUSIONS

Submarine vents located offshore Faial and São Miguel islands are similar to the sub-aerial degassing areas found out in the islands and are probably the extension of these degassing areas to the sea.

For the particular case of Ribeira Quente the submarine vents have a typical composition of hydrothermal fumaroles, similarly to the ones identified in the Furnas Volcano edifice. For all the other sampled areas (Porto Formoso and Mosteiros in São Miguel Island; and Espalamaca in Faial Island) the surveyed areas are probably part of diffuse degassing structures located along main tectonic structures that extend from land to the sea.

Analyses of these emissions are important for the seismo-volcanic monitoring programmes of the Azores archipelago as any change on the gas compositions may be a precursor of unrest episodes. Thus, this type of analyses should be implemented in a regular basis and, if possible, future works should also analyse isotopic compositions of the gases emitted.

Acknowledgements

This work was partially supported by the FCT project MOFETA (Reference Project EXPL/MAR-EST/0604/2013) and the project funded by the Regional Government: OceanA-Lab. F. Viveiros is supported by a Post-Doc Grant from Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT, Ref. SFRH/BPD/100032/2014).

REFERENCES

Baxter, P., Baubron, J.C., Coutinho, R. (1999). Health hazards and disaster potential of ground gas emissions at Furnas Volcano, São Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92:95-106.

Caliro, S., Viveiros, F., Chiodini, G., Ferreira, T. (2015). Gas geochemistry of hydrothermal fluids of the S. Miguel and Terceira Islands, Azores. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 168:43-57.

Carreiro-Silva, M., Monteiro, J., Parra, H., De Potter, K., Viveiros, F., Raimundo, J., Caetano,

M., Nogueira, M., Oliveira, A.P., Bongiorni, L. (2015). OCEANA-LAB: an ocean acidification laboratory in the Atlantic (Faial Island, Azores). 2015 *Aquatic Sciences Meeting* (Abstract ID: 27270).

Chiodini, G., Cioni, R., Guidi, M., Raco, B., Marini, L. (1998). Soil CO_2 flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Applied Geochemistry*, 13:543-552.

Chiodini, G., Frondini, F., Cardellini, C., Granieri, D., Marini, L., Ventura, G. (2001). CO_2 degassing and energy release at Solfatara volcano, Campi Flegrei, Italy. *Journal of Geophysical Research*, 106, 16213-16221.

Cruz, J.V., Coutinho, R., Carvalho, M.R., Óskarsson, N., Gislason, S.R. (1999). Chemistry of waters from Furnas Volcano, São Miguel, Azores: fluxes of volcanic carbon dioxide and leached material. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 151-167.

Ferreira, T. (1994) - *Contribuição para o estudo das emanações gasosas associadas a processos de vulcanismo no arquipélago dos Açores*. APCC thesis, Universidade dos Açores, 183p.

Ferreira, T., Gaspar, J.L., Viveiros, F., Marcos, M., Faria, C., Sousa, F. (2005). Monitoring of fumarole discharge and CO_2 soil degassing in the Azores: contribution to volcanic surveillance and public health risk assessment. *Annals of Geophysics*, 48 (4-5), 787-796.

Ferreira, T., Óskarsson, N. (1999). Chemistry and isotopic composition of fumarole discharges of Furnas caldera, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 169-179.

Ferreira, T., Viveiros, F. (2007). Anomalia geoquímica em zona residencial da Praia do Almoxarife (ilha do Faial, Açores) – Fevereiro de 2007. *DTC 14/CVARG/07*, 4p.

Gaspar, J.L., Queiroz, G., Ferreira, T., Medeiros, A.R., Goulart, C., Medeiros, J. (2015). Earthquakes and volcanic eruptions in the Azores region: geodynamic implications from major historical events and instrumental seismicity. In: Gaspar *et al*. (eds.). *Volcanic Geology of S. Miguel Island (Azores archipelago).* Geological Society, London, Memoirs, 44: 33-49.

Madeira, J., Brum da Silveira, A., Hipólito, A., Carmo, R. (2015). Active tectonics in the Central and Eastern Azores islands along the Eurasia-Nubia boundary: a review. In: Gaspar *et al*. (eds.). *Volcanic Geology of S. Miguel Island (Azores archipelago).* Geological Society, London, Memoirs, 44: 15-32.

Marcos, M. (2006). *Estudo dos processos de desgaseificação difusa nos Açores, com base na análise de variações espaciais de CO_2 e temporais de ^{222}Rn*. Master thesis, Universidade dos Açores, 135p.

Silva, C., Viveiros, F., Ferreira, T., Gaspar, J.L., Allard, P. (2015). Diffuse soil emanations of radon and hazard implications at Furnas Volcano, São Miguel Island (Azores). In: Gaspar *et al.* (eds.). *Volcanic Geology of S. Miguel Island (Azores archipelago)*, Geological Society, London, Memoirs, 44, pp. 197-211.

Viveiros, F. (2003). Contribuição para o estudo dos processos de desgaseificação difusa nos Açores no âmbito da monitorização sismovulcânica e da avaliação do risco: discriminação de factores que influenciam a variação do fluxo do CO_2. Master thesis, Universidade dos Açores, 140p.

Viveiros, F., Cardellini, C., Ferreira, T., Caliro, S., Chiodini, G., Silva, C. (2010). Soil CO_2 emissions at Furnas volcano, São Miguel Island, Azores archipelago: Volcano monitoring perspectives, geomorphologic studies, and land use planning application. *Journal of Geophysical Research*, 115, B12208.

Viveiros, F., Gaspar, J.L., Ferreira, T., Silva, C., Marcos, M., Hipólito, A. (2015). Mapping of soil CO_2 diffuse degassing at São Miguel Island and its public health implications. In: Gaspar *et al*. (eds.). *Volcanic Geology of S. Miguel Island (Azores archipelago).* Geological Society, London, Memoirs, 44:185-195.

Preparação de amostras em pó para análise quantitativa por DRX

A. Oliveira (1), M. Cabral (1), J. Duarte (1) e J. Pombo (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49 1249-093 Lisboa. anabela.oliveira@hidrografico.pt.

Resumo: Na difração de raios X (DRX) a preparação de amostras em pó é um dos passos mais criticos para determinar a composição relativa das diferentes fases cristalinas (minerais) presentes na amostra.
A análise estatística aplicada aos resultados da análise semi-quantitativa obtida por DRX em pós previamente pulverizados em moinhos de ágata (com tempos de moagem superiores a 50 minutos) e, com curvas granulométricas com d50>100 µm e d90>300 µm, mostrou um desvio padrão superior a 4% e um coeficiente de variação sempre superior a 10%, para os diferentes minerais identificados. Neste trabalho implementou-se uma nova técnica de moagem mais eficiente utilizando um moinho planetário (PM100 da Retsch) e, adotando, a moagem a húmido. Esta implementação permitiu reduzir simultaneamente os tempos de moagem para amostras siliciosas e, também, o risco de aumento da temperatura na obtenção das dimensões das partículas ideais para a análise quantitativa por DRX (d50=5 µm e d90 <25 µm).

Palavras-chave: Difração de raios X, moagem, sedimentos, minerais, granulometria.

1. INTRODUÇÃO

A análise geoquímica por difração de raios X (DRX) é uma ferramenta poderosa para determinar a composição relativa das diferentes fases cristalinas (minerais) apenas, requerendo, um trabalho de preparação simples e económico, das amostras a analisar, quando comparado com o exigido noutras técnicas analíticas.

Na preparação de amostras para a análise por DRX é fundamental usar uma amostra homogénea e representativa do material de origem. Adicionalmente, a composição da amostra não pode ser alterada antes ou durante o processo de preparação. Assim, tem que se efetuar sempre uma boa preparação da amostra para minimizar erros e assegurar a representatividade estatística.

O tamanho das partículas é um dos aspetos mais importantes na preparação da amostra, devido a dois fatores: à profundidade de penetração dos raios-X e à *estatística do cristal*. A presença de partículas demasiado grandes não representativas no topo da preparação a analisar vai influenciar os resultados obtidos que dizem respeito a estas partículas e não há composição total da amostra. Adicionalmente, a análise quantitativa (ou semi-quantitativa) de pós realizada por DRX, baseia-se no princípio de que as quantidades dos minerais são proporcionais à intensidade dos picos. Intensidades precisas requerem orientação aleatória dos cristalitos e número suficiente de partículas para uma boa representatividade estatística dos cristalitos, conhecido como *estatística do cristal ou estatística da partícula*, que diz respeito à quantidade de cristais presentes na amostra que contribuem para o processo de difração.

A influência da dimensão das partículas nos resultados da análise pode ser minimizada através de uma moagem eficiente da amostra, de modo a reduzir o tamanho médio das partículas (~5µm). Igualmente, as partículas não podem ser demasiado pequenas, porque podem ocorrer danos na estrutura cristalina ou alterações de fase, tornando-se o mineral difícil de identificar ou de quantificar as fases reais presentes na amostra. Testes experimentais realizados por Krug & Alexander (1974) mostram que para medir corretamente a intensidade do pico do quartzo$_{(101)}$, as partículas devem ter dimensões <5 µm (desvio padrão=1.2%). Assim é essencial identificar o nível ótimo de moagem da amostra, de modo a que todas as fases cristalinas estejam bem representadas e sem danos estruturais no cristal (que provocam alargamento dos picos).

Neste trabalho apresenta-se os procedimentos realizados para otimizar o processo de moagem de amostras para a análise de DRX, de forma a tornar os resultados estatisticamente representativos.

2. MÉTODOS

Como base para este trabalho utilizaram-se 7 amostras de areia de praia siliciosa com conteúdos em carbonatos variável (de cor clara, amostras 143, 144, 150, 255, 403 e 407) e 1 amostra de areia rica em minerais pesados (cor castanha, amostra 151). Para a moagem das amostras utilizaram-se dois tipos de moinhos: moinho de pilão (de ágata) e moinho planetário de bolas (PM100 da RETSCH) numa taça de moagem de 250 ml.

No moinho de pilão os tempos de moagem variaram entre 50 min e 90 min até se obter um pó fino com mediana (D50) de ~100µm.

No moinho planetário de bolas utilizaram-se várias configurações tendo em conta as recomendações do fabricante (manual do PM100 da RETSCH). Os parâmetros de moagem utilizados foram os seguintes: velocidade de rotação de 550 rpm e modo de inversão de 50 s. Verificou-se que para uma taça de 250 ml não se deve colocar mais de 5 bolas de diâmetro de 25 mm para um volume de amostra não superior a 1/3 do volume total da taça, ou seja, para cerca de 80 ml de amostra.

Foram também realizadas moagens a seco e a húmido (com água desmineralizada). Observou-se que a seco há aumento da temperatura da amostra e agregação de algumas partículas e, a húmido, se a amostra estiver líquida, não há redução da dimensão das partículas. O ideal é obter uma pasta não muito fluida. As 4 amostras foram moídas a húmido com tempos de moagem que variaram entre os 6 e 40 min., sendo posteriormente analisadas em termos dimensionais até obtenção de curvas granulométricas com D90< 25 µm e D50~5 µm) e composicionais.

Para determinar a dimensão das partículas utilizou-se o método da difração laser (Malvern Mastersizer Hydro2000G).

A análise composicional dos pós foi realizada no difractómetro de raios X da Panalytical, utilizando os critérios definidos por Oliveira *et al*. (2007). Foram realizadas 10 réplicas de cada amostra e foi realizada a respetiva análise estatística (cálculo da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação).

É de realçar que neste trabalho mostram-se apenas os resultados obtidos com o pico do quartzo (*hkl*-101). Todavia, na mistura dos pós foram identificados outros minerais (calcite, feldspatos, dolomite, hematite, magnetite, ilmenite, etc.), que também foram utilizados na semi-quantificação (100%). Estes minerais influenciam diretamente os resultados obtidos, quer pela variação das suas proporções na amostra, quer pelo seu grau de dureza.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Moagem com moinhos de ágata

As curvas granulométricas das amostras moidas em moinho de ágata apresentam uma mediana D50>102 µm e percentil 90 (D90)> 378µm. A percentagem de partículas inferiores a 5µm varia entre 7 e 12% com um D10 da ordem dos 3 a 6 µm (Tabela I).

A análise estatística aplicada aos resultados da análise semi-quantitativa obtida por DRX (Tabela I) nas amostras ricas em quatzo (143, 144 e 150) mostra, para o pico do quartzo (*hkl*-101), um desvio padrão superior a 3% e um coeficiente de variação sempre superior a 4%. Na amostra 151, onde o mineral mais abundante é a ilmenite, o quartzo tem percentagens baixas (com média 10 %) sendo de observar também um desvio padrão e um coeficiente de variação muito elevados.

*Tabela I. Parâmetros granulométricos (pm) após moagem no moinho de ágata (%<5 µm) e parâmetros estatísticos obtidos com a análise semi-quantitativa por DRX para o Quartzo (qz). Md= média; Dp=desvio padrão e Cv=Coeficiente de variação. Cv=(Dp/Md)*100).*

	pm (µm)				Qz_{101} (%)		
Am.	%<5	D10	D50	D90	Md	Dp	Cv
143	12	2.6	102	536	81	3	4
144	10	4.8	173	589	74	4	5
150	12	2.7	118	378	71	6	8
151	7	6.5	241	465	10	5	53

Esta moagem tem a desvantagem de ser muito demorada (>50 min) e de não se obter o tamanho de pós pretendido para a analise quantitativa por DRX.

3.1. Moagem com moinho planetário

Apresenta-se na figura 1 um exemplo das moagens mais eficientes obtidas pelo moinho PM100 correspondente à evolução das curvas granulométricas para a amostra 144, tendo em conta os diferentes tempos de moagem e fazendo, simultaneamente, a comparação entre a curva inicial e a obtida com o moinho de ágata.

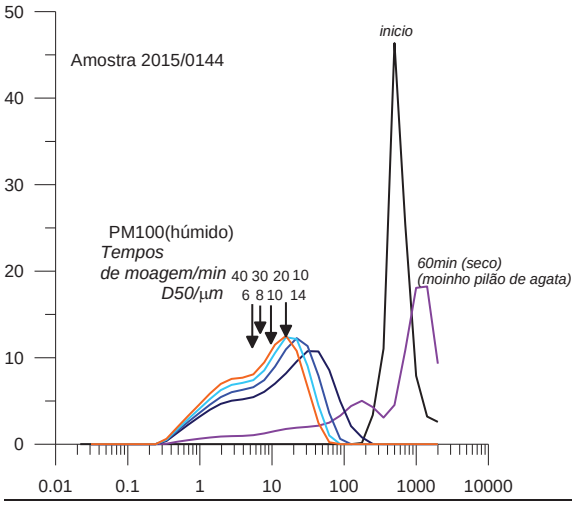


Fig. 1. Curvas granulométricas e tempos de moagem da amostra 144, obtidas com o moinho PM100 e moinho de ágata.

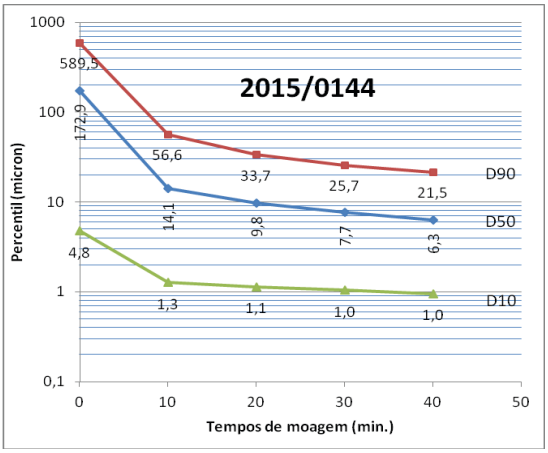


Fig. 2. Evolução dos percentis D90, D50 e D10, ao longo do tempo de moagem, para a amostra 144.

Analisando as figuras 1 e 2 verifica-se que, com o aumento do tempo de moagem, os percentis D90, D50 e D10 têm um decréscimo considerável nos primeiros 10 min. A partir daí o decréscimo do tamanho das partículas é mais subtil, ou seja, reduz-se efetivamente o tamanho das partículas de maiores dimensões (>50 µm) mas, comparativamente, o incremento percentual de partículas abaixo de 5 µm é mais lento, mantendo-se o valor de D10. O mesmo comportamento foi observado nas outras 3 amostras analisadas (Tabela II).

Tabela II. Parâmetros granulométricos (pm) após moagem no moinho PM100 e parâmetros estatísticos obtidos com a análise semi-quantitativa por DRX para o Quartzo (qz). Md = média; Dp=desvio padrão e Cv=Coeficiente de variação.

PM100			pm (µm)			Qz_{101} (%)		
Am	Min	%<5	D10	D50	D90	Md	Dp	Cv
143	6	26	1.2	14	58	83	1.7	2
144	10	26	1.3	14	56	82	1.9	2
	40	38	1	6	22	86	1.4	1.6
150	12	29	1.1	11	44	79	2.8	3.5
151	10	23	1.5	15	58	13	4	29

Nas amostras com tempo de moagens de 6 a 12 min fez-se novamente a análise estatística aplicada ao pico do quartzo (*hkl*-101). Os resultados mostram uma melhoria significativa nos valores do desvio padrão (Dp) e do coeficiente de variação (Cv) (Tabela II). Na amostra 151, em que o quartzo é um componente menor, os resultados são menos satisfatórios (Dp = 4 %).

Na amostra 144 (fig.2), para tempos de moagem maiores de 30 e 40 min., o D90 encontra-se abaixo dos 26 µm (em ambos os tempos) e o D50 é de 8 µm e de 6 µm, respetivamente. Observaram-se pequenas diferenças na percentagem inferior a 5 µm (35 e 38% em cada um dos tempos, respetivamente referidos). O D10 manteve-se inalterado. A análise estatística aplicada ao pico do quartzo (*hkl*-101) mostra uma melhoria significativa nos valores de Dp e de Cv (Tabela II).

Para comparar os resultados da análise composicional realizou-se a moagem de mais 3 amostras distintas fazendo-se a mesma análise estatística (Tabela III).

Tabela III. Parâmetros granulométricos (pm) após moagem no moinho PM100 e parâmetros estatísticos obtidos com a análise semi-quantitativa por DRX para o Quartzo (qz). Md = média; Dp=desvio padrão e Cv=Coeficiente de variação.

PM100			pm (µm)			Qz_{101} (%)		
Am	Min	%<5	D10	D50	D90	Md	Dp	Cv
255	30	39	0.9	7	26	79	1.5	1.9
403	25	37	0.8	6	22	44	4.6	10
407	30	45	0.9	4.6	16	46	4.9	10

Na amostra 255 em que o quartzo é o mineral principal a análise estatística contínua satisfatória. Contudo, em amostras em que o quartzo passa a ter valores de percentagem menores (<46 %) como é o caso da amostra 151 (rica em minerais pesados) e os casos das amostras 403 e 407 (ricas em calcite), o Dp aumenta para valores superiores a 4 %. Este comportamento é indicativo de que quanto menor for a percentagem de quartzo (ou de outro mineral) na amostra, maior é o Dp associado à sua quantificação por DRX e, portanto, mais cuidado tem que se ter na sua homogeneização e na moagem. Nesse sentido, e para se obter o maior número de partículas inferiores a 5µm, é necessário aumentar os tempos de moagem e/ou diminuir o tamanho das bolas utilizadas na moagem (<10mm), tal como é sugerido pelo Manual da Retsch (2015).

4. CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu verificar que a moagem por moinho de ágata tem a desvantagem de ser muito demorada (>50 min.) e sem se poder obter o tamanho de pós necessário para a analise quantitativa por DRX.

A moagem com moinho de bolas planetário, com tempos de moagem de 30-40 minutos, é eficiente para amostra maioritariamente siliciosas, ou seja, para aquelas em que conteúdo em quartzo é superior a 80%. Contudo, observou-se que quanto menor é a percentagem de quartzo na amostra de pós, maior é a sua variabilidade estatística e o respectivo Dp associado. Assim, utilizando este método para amostras com conteúdos em sílica inferiores a 50%, os tempos de moagem têm que ser necessariamente superiores a 30 minutos para se conseguir uma boa representatividade estatística dos cristais (ou seja para a obtenção de uma maior percentagem de partículas com dimensões inferiores a 5µm). Outro modo de obviar este problema será o de utilizar bolas de moagem com diâmetro inferior (<10mm), de modo a aumentar o grau e a eficiência da moagem (Manual da Retsch, 2015).

Agradecimentos

Agradece-se toda a colaboração prestada por Aida Seabra na moagem e homogeneização das amostras no moinho de ágata.

REFERÊNCIAS

Klug, H.P. e Alexander, L.E. (1974). X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials. Wiley, New York, 966 pp.

Manual Planetary Ball Mill PM100 / PM200 / PM 100 CM (2015). RETSCH, Germany, 60pp.

Oliveira, A., Vitorino, J., e Rodrigues, A. (2007). Sedimentary particle distribution and dynamics on the Nazaré canyon system and adjacent shelf (Portugal). *Marine Geology*, 246:105-122.

Erosional and sedimentary processes on the submarine flanks of Madeira archipelago: Preliminary results

R. Quartau (1), R. Santos (1), A. Rodrigues (1) e C. Monteiro (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas,49, 1249-093 Lisboa. rui.quartau@hidrografico.pt.

Abstract: Until the end of the last century, the detailed morphology of the submarine environment of Madeira archipelago was largely unknown. The comprehensive multibeam mapping around the Madeira archipelago allowed finding several erosional and depositional processes that shape the submarine flanks of these islands. Eight large landslides and respective depositional lobes have been found. Smaller mass-wasting processes are widespread on the upper flanks of the islands, removing material and transporting them downslope as turbidity currents, through gullies that develop downslope into channel systems. The great reduction in gradients at the lower slopes of the islands causes hydraulic jumps that promote the formation of sediment wave-fields and scours.

Key words: Madeira archipelago, Volcanic Ocean Islands, submarine flanks, erosive processes, sedimentary processes.

1. INTRODUCTION

Madeira archipelago is located in the NE Atlantic, about 1000 km SW of the Iberian Peninsula. It comprises the islands of Madeira (737 km^2), Porto Santo (42 km^2), Desertas (13 km^2) and Selvagens (~3 km^2). The subaerial island of Madeira is 58 km long in the WNW-ESSE direction, with an average width of 15 km. About 35% of the island has altitudes above 1000 m, and 90% of it, is above 500 m, reaching a maximum altitude of 1862 m (Mitchell-Thomé, 1979). Madeira has a well-developed and deeply incised subaerial drainage system, mostly oriented N-S and flowing in both directions. The Desertas Islands (Chão, Deserta Grande and Bugio) are the emerged part of a NNW-SSE submarine ridge approximately 50 km long, although their subaerial part is only 22 km long. The islands above sea-level are very narrow (< 2 km), with steep flanks (40º-85º). The Madeira-Desertas system is considered as the expression of two arms of a rift intersecting at an angle around 110º and surrounded by the 200 m isobath. Their volcanic activity also shows similarities in their products and duration (last 5 Ma, Mata et al., 2013). Porto Santo is separated from the Madeira-Desertas system by a channel 30 km wide and 2500 m deep. It is a much older island (with activity restricted to 18-8 Ma), quite eroded, not reaching more than 517 meters of altitude (Mata et al., 2013). It comprises submarine and subaerial volcanic products, and extensive outcrops of quaternary marine sediments. The top of the submarine sequence is currently near 350 m of altitude, which implies uplift of the island ~330-365 m sometime in the past (Mata et al., 2013).

The detailed submarine morphology of the Madeira archipelago remained virtually unknown until recently, with the exception of the works of Giermann (1967) and Rodrigues et al. (2006). The aim of this work is to show the several erosional and depositional processes found on the submarine flanks of the archipelago, based on the interpretation of the high-resolution bathymetric data. Several large landslides involving subaerial and submarine material from the islands and their respective submarine depositional lobes have been mapped. Smaller mass-wasting processes are common on the upper flanks of the islands, removing material and transporting them downslope through a system of gullies that develop downslope into channels. Wave-fields and scours are present in the lower slopes of the islands, probably resulting from hydraulic jumps caused by a significant gradient change at these depths.

2. DATA AND METHODS

The bathymetric mosaic used in this study resulted from merging single and multibeam datasets (Fig. 1). The deep and intermediate bathymetry was acquired with a Kongsberg EM710 and EM120 multibeam echosounders aboard the R/V "Almirante Gago Coutinho" and R/V "D. Carlos I" by Estrutura de Missão para a Extensão da Plataforma Continental and the Instituto Hidrográfico (IH) SEDMAR (Sedimentary environment of the Madeira archipelago) program. Shallow water multibeam bathymetry on the southern shelves of Madeira and Porto Santo Islands were acquired with a Kongsberg EM3000 and EM3002 onboard a survey launch in the scope of marine aggregate evaluation projects (AREIAS) requested by the regional authorities to IH. The multibeam bathymetry was DGPS-positioned and processed using Caris Hips & Sips. The processing workflow encompassed corrections for the effects of the tide and manual editing and automated filters (CUBE algorithm) to remove noise and spikes on bathymetric data. High-resolution

DEMs were produced with cell-size varying from 2 m in shallow water (< 100 m) to 250 m at over 4500 m (Fig. 2). Radiometric and geometric corrections were also applied with the Fledermaus Geocoder Toolbox (FMGT) to determine the backscatter strength (Fonseca and Mayer, 2007) in order to build backscatter mosaics (Fig. 3). Where multibeam data was missing, single-beam bathymetry (grid-size of 1/8 * 1/8 minutes, ~230 x ~190m) from the European Marine Observation and Data Network (EMODnet) project portal was used to fill the gaps.

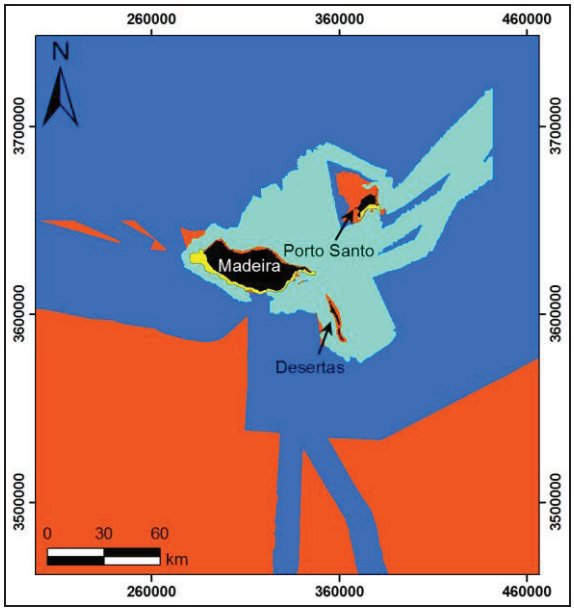


Fig. 1. Black areas represent the islands. Coloured areas represent the bathymetric sources: yellow, data from AREIAS, light-blue, from SEDMAR, dark blue, from EMEPC and, orange, from EMODnet projects.

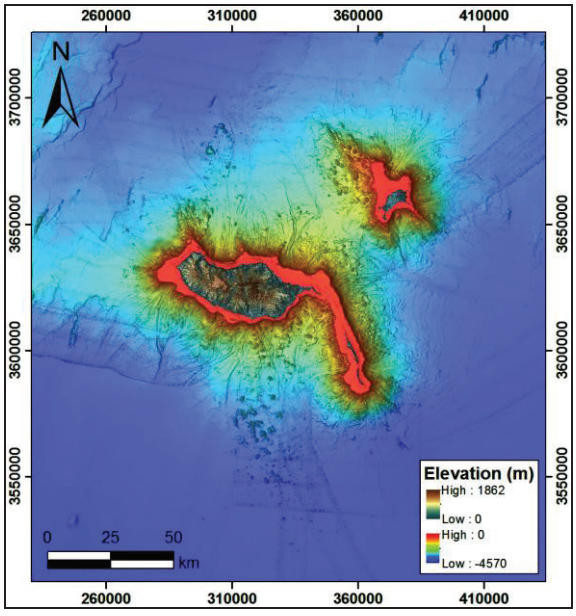


Fig. 2. Shaded relief imagery derived from the bathymetric compilation.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The interpretation of the multibeam bathymetry and backscatter (Figs. 2 and 3) allowed mapping the submarine environments around Madeira, Porto Santo and Desertas Islands from the shelf down to depths of 4500 m. We have found several erosive and sedimentary morphologies such as headwall scars of landslides and respective debris avalanches, gullies and channels, sediment waves and scours (Figs. 4 and 5).

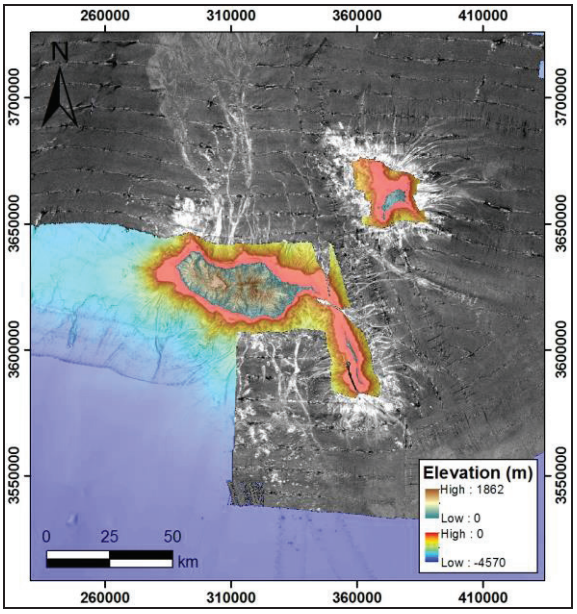


Fig. 3. Acoustic backscatter mosaic with low backscatter values in black and high backscatter values in white (-70 dB to 10 dB).

3.1. Major Landslides

Seven major landslide scars were identified incising the shelf break of these islands (Fig. 4): in the NNW, NW and NE of Madeira, N and S of Porto Santo and W and E of Desertas. They have wide headwall regions (greater than 8 km across) and a chute below the shelf break that gives rise downslope to a series of parallel channels forming poorly defined depositional lobes. An additional huge landslide in the SE Madeira is inferred based on the mapped debris avalanche. The remaining mass-wasting features are smaller headwall scars on the shelf break incised by gullies that develop downslope into a series of parallel to dendritic channels.

With the exception of the landslide inferred at the SE of Madeira and N of Porto Santo, all of them show concave coastlines mimicking the arcuate shelf break scars. Hence, these major landslides have likely included subaerial and submarine material when they first moved. Some of them had already been identified during the geological subaerial mapping of Madeira (Brum da Silveira et al., 2010). We suspect that all of these major landslides are at least hundreds of thousands of years old because they often show at least one of the following features: (1) Well-developed channel systems in front of their chutes, incising the debris avalanche deposits, (2) Relatively wide-shelves in front of the arcuate coastlines and, (3) Volcanic progradation with several hundred thousand of years filling the

subaerial scars (Brum da Silveira et al., 2010).

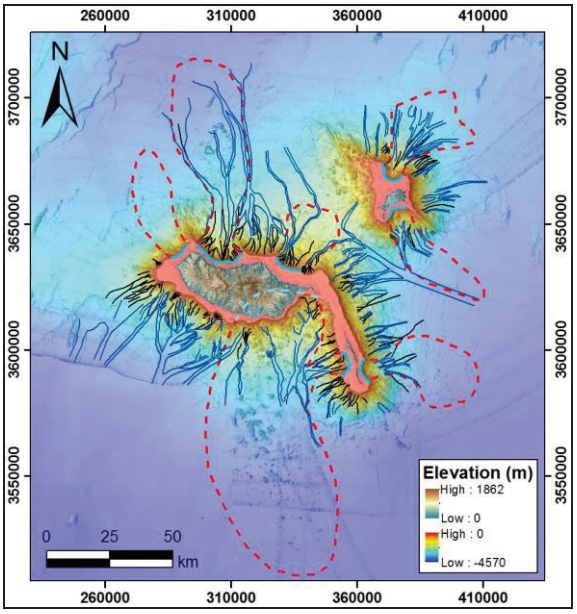


Fig. 4. Interpreted submarine topography: light blue lines represent the headwall scars of the landsides, black lines represent the gullies, dark blue lines represent the channels and dotted red lines represent the depositional lobes of the landslides' debris avalanches.

3.2. Gullies and Channels

The shelf break is often incised by small headscars, indicating failure processes, with downslope sediment movement through one or more gullies. The gullies are located on the steepest gradients of the submarine slopes, just below the shelf break of the islands. They are V-shaped and up to 5-10 km in length and a few hundred-metres wide (Fig. 4). They can be either parallel or dendritic, but normally converge into the channel system. The channels are U-shaped features that develop normally at gradients smaller than 15º, have also parallel to dendritic configuration, normally converging downslope into a bigger main channel (Fig. 4). The smaller and upper channels can be around 500 m-wide, but the lower and wider ones can be up to 5 km wide and can reach 60-70 km from the shelf break. These channel systems are absent from the W slopes of Madeira and Porto Santo.

The channels were most likely formed by turbidity currents that can be triggered by several types of processes: (i) volcanism (syn-eruptive mass flows, lava deltas collapses, and contemporaneous volcano-seismic activity; Manville et al., 2009); (ii) enhanced precipitation generating hyperpycnal flows off streams (Talling, 2014); (iii) and stormy waves (Tsutsui et al., 1987). The last two processes must have been enhanced during lowstands, promoting even more the incision of gullies at the shelf edge. In the south of Madeira, there a few cases where subaerial streams are linked to the submarine gullies and channels network.

3.3. Sediment wave-fields

Sediment wave-fields are only found east of Desertas, S and N of Porto Santo and NNW of Madeira (Fig. 5). They can be classified in three main types: (1) wave fields associated to depositional lobes such as the cases of the major landslides of the NNW Madeira, the E of Desertas, and S and N of Porto Santo, (2) wave fields downstream of the gullies and channels system E of Desertas and (3) wave fields inside the channels on N of Porto Santo (located by arrows in Fig. 5).

These bedforms have wave-heights of 2-100 m and wave lengths of 600-5000 m. In cross-section, they can present either downslope or upslope asymmetrical shapes, and in plan-view their wave crests can have sinuous, straight, crescentic upslope and crescentic downslope forms. Based on their characteristics (wave height and wave length dimensions) they can be classified as large sediment waves, typically located in relatively unconfined settings and composed of fine-grained sediment (Symons et al., 2016). In fact, they share a common characteristic in this archipelago; they occur within the same depth range (3000-4300m), normally when the channel systems ends, which corresponds to a significant decrease in seafloor gradients to 0.5º-3º. We therefore interpret the wave-fields as being formed by deeper unconfined turbidity currents on the base of the island flanks. These flows are initially constrained within the gullies and channels but rapidly become unconfined downslope where this drainage system stops and therefore spread out over an extensive area. These wave-fields are believed to be formed by cyclic steps, where deposition occurs dominantly on the upslope flank and erosion occurs on the downslope flank, resulting in the up-current migration of the bedform crests (Postma et al., 2009). The reduction of slope gradients would force the flow to pass the hydraulic jump at some time, during which the velocity of the flow would be reduced significantly and its thickness markedly increased, favouring the development of these bedforms.

3.4. Scours

Scours are abundant features on the lower slopes of the islands. The term 'scour' is used to denote isolated, roughly equidimensional cut-and-fill features where the erosion and subsequent depositional fill are most commonly produced by the same flow (Mutti & Normark, 1987). In the Madeira archipelago, these structures are commonly roughly oval or rectangular in shape, displaying a well-defined headwall scar (up to 20 km) aligned transverse to the main flow pathway, and they are commonly deepest just downslope of the headwall. They occur within the same depth range (3000-4300m) and seafloor gradients (0.5º-3º) of the wave fields. They can be found, either, immediately downslope of the canyon/channel mouths or be

unrelated to these drainage systems. We interpret them as formed where the reduction of slope gradients causes the first big hydraulic jump, promoting erosion of the sedimentary seafloor (Mutti & Normark, 1987).

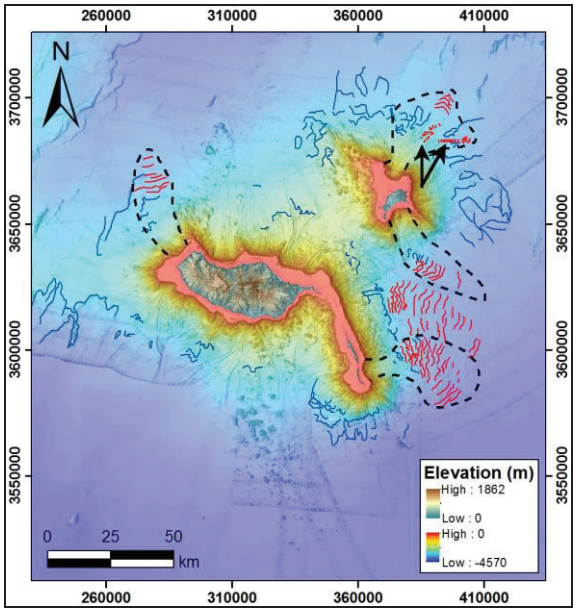


Fig. 5. Interpreted submarine topography: red lines represent the wave crests of the bedforms, dark blue lines represent the headwall of the scours and dotted black lines represent the depositional lobes of the landslides' debris avalanches. Arrows point to wave fields inside channels.

4. CONCLUSIONS

Prior to this study, the processes shaping the submarine morphology of the Madeira archipelago were mostly unknown. Acquisition of new multibeam bathymetry provided the discovery of several erosive and sedimentary morphologies such as headwall scars of landslides and respective debris avalanches, gullies and channels, sediment waves and scours on the submarine slopes of this archipelago.

REFERENCES

Brum da Silveira, A., Madeira, J., Ramalho, R., Fonseca, P. and Prada S. (2010), *Carta Geológica e Notícia Explicativa da ilha da Madeira na escala 1:50.000, Folhas A e B.* Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais e Universidade da Madeira. 47 pp.

Fonseca, L., e Mayer, L. (2007). Remote estimation of surficial seafloor properties through the application Angular Range Analysis to multibeam sonar data. Marine Geophysical Researches, 28(2), 119-126.

Giermann, G. (1967). Vallées sous-marines sur la pente méridionale de i'lle de Madère. *Bulletin de L'Institute Océanographique*, 67, 2-8.

Manville, V., Németh, K. and Kano, K. (2009), Source to sink: A review of three decades of progress in the understanding of volcaniclastic processes, deposits, and hazards. *Sedimentary Geology*, 220(3-4), 136-161.

Mata, J., Fonseca, P., Prada, S., Rodrigues, D., Martins, S., Ramalho, R., Madeira, J., Cachão, M., Marques da Silva, C. and Matias, M.J. (2013). O arquipélago da Madeira. In: R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha and J. C. Kullberg (eds.). *Geologia de Portugal, Volume II – Geologia Meso-cenozóica de Portugal*, Escolar Editora, Lisboa, 691-746.

Mitchell-Thomé, R.C. (1979). Notes on the geomorphology of Madeira. *Boletim do Museu Municipal do Funchal*, 32, 5-18.

Mutti, E., and W. R. Normark (1987). Comparing examples of modern and ancient turbidite systems: problems and concepts In: J. K. Leggett and G. G. Zuffa (eds.). *Marine clastic sedimentology: concepts and case studies*. Graham and Trotman, London, 1–38.

Postma, G., M. Cartigny, and K. Kleverlaan (2009), Structureless, coarse-tail graded Bouma Ta formed by internal hydraulic jump of the turbidity current? *Sedimentary Geology*, 219(1–4), 1-6.

Rodrigues, A.; Oliveira, A.; Fonseca, R.; Tabord, R., Cascalho, J. (2006), Sedimentary dynamics of the Southern shelf of Madeira (Portugal). Journal of Coastal Research, SI 39: 454 – 458.

Symons, W.O., Sumner, E.J., Talling, P.J. Cartigny, M.J.B. and Clare, M.A. (2016). Large-scale sediment waves and scours on the modern seafloor and their implications for the prevalence of supercritical flows. *Marine Geology*, 371, 130-148.

Talling, P. J. (2014). On the triggers, resulting flow types and frequencies of subaqueous sediment density flows in different settings. *Marine Geology*, 352, 155-182.

Tsutsui, B., J. F. Campbell, and W. T. Coulbourn (1987), Storm-generated, episodic sediment movements off Kahe Point, Oahu, Hawaii. *Marine Geology*, 76, 281-299.

Estrutura sismo-estratigráfica da parte terminal do vale do Tejo

A. Vinhas (1), A. Rodrigues (1) e L. Reis (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49 1249-093 Lisboa, andre.costa@hidrografico.pt.

Resumo: O estuário do rio Tejo transita para o ambiente de plataforma através de um vale natural de direção E-W, de origem tectónica. Sujeito a uma dinâmica muito forte, este vale apresenta caraterísticas morfosedimentares indicadoras de grande mobilidade sedimentar, com uma camada de sedimentos não consolidados pouco expressiva e subafloramento de formações geológicas antigas e muito competentes. A análise de 55 perfis de reflexão sísmica monocanal (sistema *Boomer*) obtidos pelo Instituto Hidrográfico entre 2009 e 2014, permitiu descrever a estrutura sismo-estratigráfica deste setor do estuário do Tejo e, pela primeira vez, esboçar um mapa de espessura da unidade sísmica mais recente.

Palavras-chave: Reflexão sísmica, espessura de sedimentos, Rio Tejo.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Objetivos

O canal do rio Tejo constitui um vale natural, controlado tectonicamente, por onde transita, para a plataforma continental, um grande volume de sedimentos, entre 10^5 a 10^6 ton/ano (Vale e Sundby, 1987; Vale, 1990). Não sendo conhecida, em pormenor, a estrutura do leito do rio, este trabalho tem como objetivo a descrição e cartografia das principais unidades sismo-estratigráficas que se identificam no sector terminal do rio Tejo, bem como a configuração da camada sedimentar recente presente no seu leito.

1.2. Enquadramento geológico

Do ponto de vista geológico, a área de estudo insere-se no setor distal da Bacia Cenozóica do Baixo Tejo (BBT), depressão alongada de direção NE-SW, marginada a W e N por formações mesozóicas da Bacia Lusitaniana (BL) e a NE e E pelo soco hercínico (Figura 1A). A origem desta bacia relaciona-se com a fase pirenaica da orogenia Alpina. A estrutura da bacia é bastante simples, limitada por falhas normais, que foram reativadas durante a subsidência generalizada que ocorreu no Miocénico. Este movimento convergente é particularmente visível no seu bordo NW, onde os terrenos mesozóicos cavalgam os terciários. O preenchimento da BBT é composto principalmente por sedimentos continentais detríticos, de idade Paleogénica e Neogénica, em que as intercalações de material de fácies marinha e de transição testemunham o efeito das grandes movimentações eustáticas que ocorreram durante o Miocénico (Ribeiro *et al.*, 1979), intercaladas com movimentações verticais de origem tectónica (Pais *et al.*, 2012). A espessura total dos depósitos cenozóicos da bacia pode atingir os 1400 m entre Benavente e Coruche, podendo o Neogénico atingir os 1200 m (Ribeiro *et al.*, 1979; Vitor *et al.*, 1980) (Figura 1B). O Paleogénico é constituído por conglomerados, arenitos e argilitos e intercalações calcárias, correspondendo às primeiras fases de preenchimento da bacia (fase pós-*rifting*). O Miocénico é caraterizado por depósitos sedimentares de fácies continental e marinha, tendo sido cartografadas, na região de Lisboa, alternâncias de argilas, calcarenitos e areias (Cotter, 1956 *in*: Simões, 1998). A espessa série arenosa do Pliocénico tem intercalações lenticulares de argilas de origem fluvial (Azevedo, 1982). As oscilações eustáticas do Plistocénico permitiram a formação de conglomerados, margas, argilitos e conglomerados, terraços fluviais e marinhos. Por último, o Holocénico aflorante está representado apenas por areias de praia, dunas e aluviões.

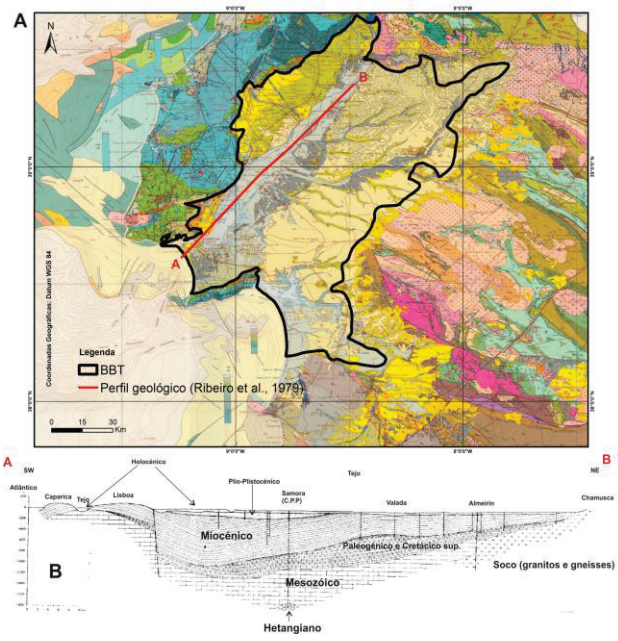


Fig.1. (A) Excerto do mapa geológico com limite da BBT e (B) corte geológico esquemático (Ribeiro et al., 1979).

2. DADOS E METODOLOGIA UTILIZADOS

Para a interpretação da unidade sísmica mais recente, foram analisados 55 perfis de reflexão sísmica ligeira monocanal obtidos com sistema *Boomer* (resolução vertical da ordem dos 50 cm), entre 2009 e 2014, pelo Instituto Hidrográfico (IH) (Figura 2).

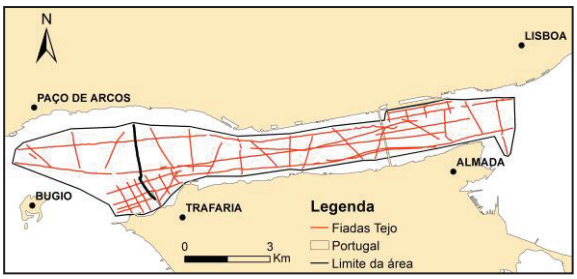


Fig.2. Localização da área de trabalho (delimitada a negro) e das fiadas utilizadas para elaboração do mapa de espessuras. A preto localização das fiadas da figura 3.

A distribuição espacial destes perfis é bastante irregular, tendo sido selecionados, para análise sismo-estratigráfica, apenas os mais representativos da variabilidade espacial do sistema. Os registos sísmicos foram processados no *software Delph Seismic* da IXBLUE, onde foi feita a correção do *layback*, aplicação de filtros passa-banda (passa-alto e passa-baixo), ganhos do sinal, correção de *swell* (quando aplicável) e por fim o *stacking* dos traços. Após o processamento, a análise de fácies sísmicas e a interpretação das principais unidades sísmicas teve como base os princípios formalizados por Mitchum & Vail (1977). A unidade sísmica superficial foi exportada do *software Delph Seismic* sob a forma de um ficheiro CVS para realizar um mapa de espessuras. Estes valores foram tratados em *software* de informação geográfica, sob a forma de pontos com coordenadas e respectivas espessuras, que foram interpolados através do método determinístico IDW (*Inverse Distance Weighted*).

3. RESULTADOS

Apesar do elevado número de perfis sísmicos utilizados na elaboração do mapa de espessuras, a análise e descrição das unidades sísmicas foi realizada essencialmente a partir de três perfis transversais ao canal, aproximadamente com a orientação N-S, num setor a montante, intermédio e a jusante do canal do rio Tejo. Com esta análise foram individualizados dois níveis hierárquicos, unidade sísmica (nível 1) e sub-unidade sísmica (nível 2), correspondendo, esta última, a uma unidade de expressão local, com caraterísticas distintas, no interior da unidade principal de nível 1.

3.1. Unidades sísmicas

Nos perfis analisados foram identificados 5 unidades sísmicas principais, delimitadas por quatro descontinuidades, denominadas por F, Sm, S1 e S2, cuja expressão física é observável em grande parte da área de estudo. As unidades sísmicas definidas, do topo para a base, são denominadas como Um, U1 subdividida em U1b, U1a, U2 e U3 (Figura 3).

A superfície do leito do estuário é caraterizada por um refletor irregular e contínuo, com amplitude forte a muito forte. A descontinuidade Sm delimita a base da primeira unidade sísmica (Um) e corresponde a um refletor contínuo, com amplitude forte a média. A unidade sísmica mais superficial (Um), apresenta uma fácies sísmica caraterizada por grande variabilidade na configuração dos refletores internos, os quais se apresentam com geometria irregular, em montículos, divergentes ou sub-paralelos, dependendo da orientação do perfil e da sua localização no canal. As terminações dos refletores internos da unidade, quando bem identificadas, são do tipo *onlap* e *downlap* contra os refletores do topo e da base da unidade sísmica. No setor a jusante e a sul do canal, abaixo do refletor Sm, foi identificada uma unidade sísmica U1 que foi divida nas subunidades U1a e U1b. De uma forma muito geral, a fácies sísmica desta última sub-unidade é caraterizada por refletores com amplitude elevada e pouca continuidade lateral. A sua inclinação para Norte, as várias descontinuidades angulares identificadas no interior da sequência e as terminações dos refletores contra o topo da sequência, mostram tratar-se de uma unidade tipicamente de enchimento, sendo a acreção efetuada de sul para norte.

A unidade sísmica U2 é definida pelos refletores S1 e S2, ambos com evidências de terem constituído superfícies de erosão e falhadas por deformação posterior. A Unidade U2 apresenta refletores de boa continuidade e amplitude, com inclinação variável, dependendo da movimentação dos blocos falhados.

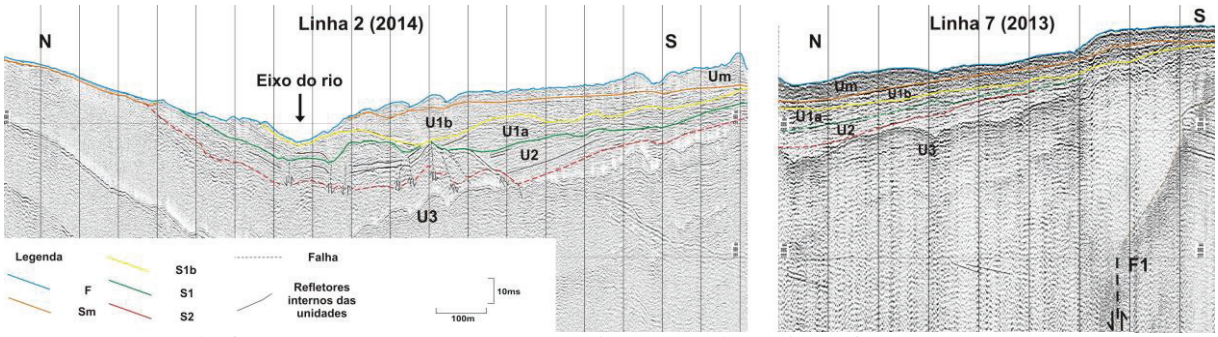


Fig.3. Excertos de perfis sísmicos representativos da estrutura identificada nos perfis de reflexão sísmica. Localização na Figura 2.

Abaixo do refletor S2 (contínuo, muito irregular e de alta amplitude) identificou-se a unidade mais antiga (U3) que constitui soco acústico, apesar de localmente apresentar alguns vestígios de reflexões internas de elevada amplitude e pouca continuidade.

3.2. Espessura da unidade superficial (Um)

As caraterísticas acústicas da unidade sísmica Um e a geometria do refletor F (correspondendo ao fundo estuarino), ilustram que esta camada está sujeita a um forte hidrodinamismo, principalmente junto ao eixo do canal.

Para a elaboração do mapa de espessuras da unidade sísmica superficial (Um), foram considerados apenas os reflectores Sm e F (Figura 3). Após a medição do espaçamento vertical (em mseg) entre estes dois reflectores e realizada a conversão para espessura, considerando uma velocidade média de propagação do som de 1800 m/s de acordo com os valores tabelados por Hamilton & Bachman, (1982), foi criado o mapa de espessuras representado na Figura 4.

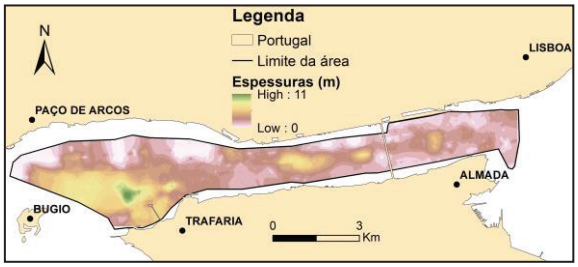


Fig.4. Mapa de espessuras da unidade superficial (Um).

A análise realizado nos 165 137 pontos de medição de espessura vertical, permite constatar que a camada de sedimentos móveis varia entre 0 e 11 m, sendo que o valor médio é de 2 m. A maior espessura de sedimentos (mais de 3 m) é encontrada na área central, a jusante da ponte e, na margem sul entre a Trafaria e o Bugio. Com base nesta distribuição das espessuras é possível inferir a (paleo)configuração da bacia antes da deposição desta camada, constatando-se que, na altura em que se formou a superfície de erosão (refletor Sm), o (paleo)vale seria mais amplo e poder-se-ia ter localizado mais próximo da margem sul, no sector entre o Bugio e a Trafaria. Contrariamente, na margem norte e no mesmo setor, a camada de sedimentos recentes é muito pouco significativa (espessura inferior a 50 cm).

3.3. Estratigrafia e estrutura geológica

Tendo em conta as caraterísticas da unidade sísmica Um, e o enquadramento geológico descrito no ponto 1, aponta-se para que as unidades subjacentes à camada superficial, U1b e U1a, correspondam a formações de enchimento de bacia, formadas em períodos distintos: a unidade mais superficial (U1b) terá sido formada durante a transgressão do Plio-Quaternário identificando-se, no refletor da base, S1b, o provável paleovale do rio Tejo desviado cerca de 250 m para S relativamente ao atual; a unidade U1a, é mais antiga e corresponde à expressão da grande acumulação sedimentar da transgressão miocénica. No perfil 2 (Figura 3), verifica-se que a deformação dos refletores internos de ambas as sub-unidades, parece indicar reactivação das falhas que afetam as unidades subjacentes, U2 e U3. Estas unidades mais antigas correspondem às formações detríticas do Paleogénico-Mesozóico superior (primeiras fases de enchimento *pós-rifting*) e do Mesozóico (soco acústico).

Apesar de Oliveira (1967) referir uma origem não tectónica para a parte terminal do rio, nos perfis analisados, foi evidenciada a deformação frágil da zona central do vale do Tejo, tendo sido ainda identificada, junto à Trafaria, um alinhamento profundo de direção ENE-WSW, provável falha com movimentação essencialmente vertical (ver Linha 7 da Figura 3 e distribuição das isolinhas do mapa de espessuras junto à Trafaria na Figura 4). É de admitir que este acidente tectónico rejogou em alturas distintas da evolução meso-cenozóica, podendo a sua presença ainda ser visível na morfologia atual do fundo do rio. A localização desta estrutura permite associá-la à falha do "Gargalo do Tejo", falha cega enraizada num nível de descolamento intracrustal a 15 km de profundidade (Ribeiro *et al*., 1986 *in* Pais *et al*., 2006). O controlo estrutural do encaixe do rio Tejo, segundo um contato litológico de orientação ortoclinal ou aproveitando uma linha de fratura com direção E-W, já havia sido defendido anteriormente por aqueles autores.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A interpretação dos perfis de sísmica monocanal obtidos ao longo de seis anos, pelo Instituto Hidrográfico no canal do rio Tejo, permitiu elaborar um mapa preliminar de espessura da camada superficial móvel e fazer uma primeira caraterização sismo-estratigráfica das unidades subjacentes.

Foi delineado um mapa de configuração da camada de sedimentos que, de uma forma geral, tem espessura inferior a 8 m, encontrando-se mais desenvolvida junto à margem sul no setor entre a Trafaria e o Bugio. Por baixo desta unidade sismo-estratigráfica, identificaram-se outras 4 unidades distintas que ilustram a evolução meso-cenozóica do estuário do Tejo, o qual apresenta um traçado aparentemente condicionado pela presença de falhas com movimentação vertical importante. A deformação é particularmente evidente nas unidades mais profundas.

Os episódios de estiramento crustal mesozóico estão na origem das depressões, cujo enchimento permitiu a edificação das unidades U2 (Mesozóico sup.-Paleogénico) e U1 (Miocénico e Pilo-Quaternário),

separadas por importantes superfícies de erosão/discordância angular. O estilo de deformação destas duas unidades é distinto (U2 afetada pelo falhamento do soco; U1 apenas dobradas, sem ruptura de refletores).

O topo da unidade miocénica (U1a) corresponde a uma superfície de aplanação, tendo sido identificadas duas depressões que aparentam ser antigos vales fluviais. Esta superfície está fossilizada por sedimentos mais finos, de idade plio-quaternária (U1b), e pela camada de sedimentos móvel, de idade posterior ao Último Máximo Glaciário (Um).

Sendo este trabalho preliminar, as próximas etapas na investigação deste estuário, passarão naturalmente pela aquisição de dados adicionais que permitam confirmar e refinar a interpretação descrita.

REFERÊNCIAS

Azevedo, M. T. (1982). O sinclinal de Albufeira – evolução pós-miocénica e reconstituição paleogeográfica. *Dissertação de doutoramento*. Univ. Lisboa. 302.

Dias, J.A.; Rodrigues, A.; Magalhães, F. (1997). Evolução da linha de costa, em Portugal, desde o último máximo glaciário: Síntese dos conhecimentos. *Estudos do Quaternário*. Lisboa, Portugal, 1:53–66.

Hamilton, E. L., and R. T. Bachman (1982). Sound velocity and related properties in marine sediments, *J. Acoust. Soc. Am*., 72(6):1891–1904.

Mitchum, R. M. Jr.; Vail, P. R. (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 7: Seismic stratigraphic interpretation procedure. In: Seismic Stratigraphy – App. Hydrocarbon Exp. Payton, C. E. (Ed.). *Am. Ass. Petrol. Geol.*, Mem. 26, 135 – 143.

Oliveira, R. A. M. (1967). Contribuição para o estudo do estuário do Tejo – Sedimentologia. *LNEC*. Mem. Nº 296. Lisboa. 61.

Pais, J.; Cunha, P.; Legoinha, P.; Dias, R. P.; Pereira, D.; Ramos, A. (2012). Cenozóico das Bacias do Douro (sec. ocidental), Mondego, Baixo Tejo e Alvalade. *Geol. Portugal, Vol II – Geol. Meso-cenozóica de Portugal*. Esc. Ed. 461 – 535.

Pais, J.; Moniz, C.; Cabral, J.; Cardoso, J. L.; Legoinha, P.; Machado, S.; Morais, M. A.; Lourenço, C.; Ribeiro, M. L.; Henriques, P.; Falé, P. (2006). Not. Expl. folha 34-D (Lisboa) da Carta Geol. Portugal (esc. 1:50000). *INETI*. Lisboa. 74pp.

Ribeiro, A.; Antunes, M. T.; Ferreira, M. P.; Rocha, R. B.; Soares, A. F.; Zbyszewski, G.; Moitinho de Almeida, F.; Carvalho, D.; Monteiro, D. (1979). Intro. à la Géologie Générale du Portugal. *Serv. Geo. Portugal*. Lisboa.

Ruddiman, W.F.; McIntyre, A., (1981). The north Atlantic ocean during the last deglaciation. *Palaeogeo.Palaeocli.Palaeoecology*, 35:145-214.

Simões, M. M. M. (1998). Contribuição para o conhecimento hidrogeológico do Cenozóico na Bacia do Baixo Tejo. *Dissertação de doutoramento.* Univ. Nova de Lisboa. 270 pp (*não publicado*).

Vale, C. (1990). Temporal variations of particulate metals in the Tagus river estuary. *The science of the total environment*, 97-98, 137-154.

Vale, C.; Sundby, B. (1987). Suspended sediment flutuations in the Tagus estuary on semi-diurnal and fortnightly time scales. *Est. C. and Shelf Sci.,25:495-508.*

Vítor, L. A. Mendes; Him, A.; Veinante, J. L. (1980). A seismic setion across the Tagus valley, Portugal: Possible evolution of the crust. *Ann. Géophys*., t. 36, fasc. 4, 469 – 476.

The heavy mineral sorting process: the example from Grande beach (Sintra, Portugal)

J. Cascalho (1,2), M. Ribeiro (2,3), R. Taborda (2), A. Rodrigues (3), J. Reis (1), J. Duarte (3), A. Oliveira (3)

(1) Museu Nacional de Historia Natural e da Ciência, Universidade de Lisboa, 1250-102 Lisboa; jpcascalho@ciencias.ulisboa.pt.

(2) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1749-016, Lisboa.

(3) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249-093, Lisboa.

Abstract: Grande beach's sand often presents a dark color due to the abundant presence of heavy minerals. This work aim to understand this phenomenon based on the analysis of heavy mineral distribution along Grande beach and adjacent beaches located in the same sedimentary littoral cell (São Lourenço, Foz do Lizandro, Maçãs, Pequena, Adraga, Abano and Guincho). The results show that the samples collected at Grande beach reveal a very high concentration in heavy minerals, with values ranging between 3 and 76 %. These values present a very high contrast with the ones obtained from the other beaches that are always lower than 0.5 %. This support the idea that the Grande beach has the ideal conditions for the development of particle sorting processes that promote the heavy mineral concentration. One of these sorting processes operates at large time scales (centuries to millennia), is responsible for the high background concentration of heavy minerals, and is related with the selective longshore transport promoted by a remarkable rock promontory at the southern limit of the beach. The other, sporadic, is a consequence of a sorting process that take place during sea storms that promote the erosion of the emerged beach profile, and is responsible for the periodic occurrence of a massive placer on the beach.

Key words: sand, mineralogy, source and distributor processes.

1. INTRODUCTION AND OBJECTIVES

Sand composition analysis can be a very useful tool to interpret littoral sediments dynamics. In this context heavy mineral compositional analysis has been used to identify sedimentary sources and particle transport's patterns in littoral environments (Komar and Li, 1991). At Grande beach (located at Sintra municipality, Portugal, 38º 48' 37'' N; 9º 28' 51'' W) it is common observe the presence of blackish sand that makes a contrast with the predominant white sand that characterize the nearby beaches. In some occasions, after storm events, Grande beach's sand turns entirely black reminding a beach of a basaltic region. This phenomenon seems to be restricted to this beach as it is not reproduced on the adjacent beaches. In order to understand the reasons behind this particular setting the mineralogical composition of the Grand beach and of other 7 nearby beaches was studied. A total of 9 samples were collected from 8 beaches located in the coastal section between São Lourenço and Guincho (Figure 1).

2. METHODS

Sediment sampling was made along the beaches between São Lourenço and Adraga on February 11th 2015. Later, on November 27th 2015, 2 more samples collected on Abano and Guincho beaches. All these samples were collected using a small pvc tube with a length of 0.5 m and a diameter of 4.5 cm on the beach face during low tide at about 2 m height relatively to the mean sea level.

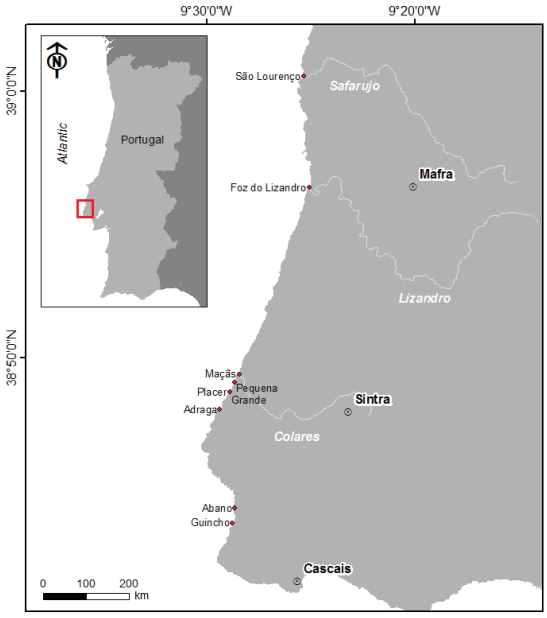


Fig. 1. Location of the studied beaches and fluvial network.

This procedure follows the rules described on the technical note of the Beach Sand Code (2012) project in order to obtain a set of composite samples

that represent the average textural and compositional characteristics of each sediment beach. On February, 13th, 2014 it was collected at Grande beach another sample (Grand placer - GRpla) that characterizes this beach after the occurrence of several winter storms. This sample was collected by hand and it represents the upper most 30 cm of the beach face. Grain size analysis using classical sieving method was made for particles coarser than 1 φ (0.5 mm) and laser diffraction was used for the size analysis of finer particles. Sediment magnetic susceptibility was measured on all the collected samples. Firstly, every sample was independently washed, dried and homogenized in plastic boxes. Then magnetic susceptibly was measured in 15 points per each sample using the 3.8 mm Bartington MS2E high resolution sensor. After the sampling operation the medium to fine sand (1-3 φ or 0.5 to 0.125 mm) was washed with a HCl 10 % solution in order to eliminate all the biogenic particles (shell fragments). All the samples were washed with tape water and the heavy minerals were separated from the light ones' using bromoform and then mounted using Canada balsam on glass slides. A micro splitter was used to obtain the fair amount of grains for in each slide to fill an area with 25x30 mm without grain overlapping. About 400 heavy minerals grains per slide were identified and counted under the petrographic microscope according to the ribbon method (Mange and Maurer, 1992). For the sample collected from Grande beach (GRpla) at February 13th, 2014 the mineralogical composition was also analyzed through X ray. This sample was previously triturated and reduced to powder (<25µm). The measuring was done between 4º e 60º 2θ, with CuKα (45Kv e 40mA) radiation using a step of 0.02°(2θ) and a counting time of 1 s. The relative mineral abundance was computed by the peak graphic area method considering the reflection power of the identified minerals (Rocha, 1993).

3. RESULTS

The main textural characteristics of the beach collected sediments is showed on Table I (see the top of the next page). We can observe that these sediments have mean grain size of coarse sand (between 0 e 1 φ), except for São Lourenço (SL sanple) that has very coarse sand and GRpla sample that corresponds to medium sand. The sorting values show that the collected sediments range between very well calibrated (Pequena beach) and moderately well calibrated (São Lourenço, Foz do Lizandro and Maçãs beaches).

On Figure 2 it is possible to verify that the magnetic susceptibility is extremely high in the case of GRpla sample witch shows a high contrast with the other collected samples.

The results of the mineralogical composition obtained through the X ray diffraction show that the sediments of the GRpla sample are essentially composed by ilmenite (36 %) and magnetite (29 %) and, in minor quantities by hematite (11 %), garnet (8 %) and zircon (6 %). Quartz, calcite, potassic feldspar and dolomite are present in minor quantities (between 2 and 4 %).

The results for the heavy mineral weight percentage shows that the most part of the collected samples have very low concentration on these minerals (< 0.5 %) with clear exception of the 2 samples collected from Grande beach which reveal a concentration of about 3 % (GR sample) and of about 77 % (GRpla sample) – Table II.

Table II. Values of the heavy mineral weight percentages (MP %).

Beach	MP %
São Lourenço (SL)	0.03
Foz do Lizandro (FL)	0.10
Maçãs (MA)	0.18
Pequena (PEQ)	0.31
Grande (GR)	3.14
Grande placer (GRpla)	76.64
Adraga (ADA)	0.42
Abano (ABA)	0.17
Guincho (GUI)	0.10

The optical identification of the heavy minerals reveal an assemblage composed by 14 species: tourmaline (TOU), clinopyroxene (CPX), garnet (GAR), staurolite (STA), andalusite (AND), amphibole (AMP), zircon (ZIR), epidote (EPI), rutile (RUT), titanite (TUT), biotite (BIO), apatite (APA), cyanite (CYA) and silimanite (SIL).

Figure 3 shows the distribution pattern of the 7 most important mineral species for the locations of the sampled beaches. The prevailing heavy mineral assemblage is invariably composed by TOU, CPX, GAR and STA.

This mineral homogeneity is only counteracted by the composition of the GRpla sample that reveals a transparent heavy mineral assemblage dominated by GAR, STA and ZIR and also by FL sample that reveals a high frequency of CPX.

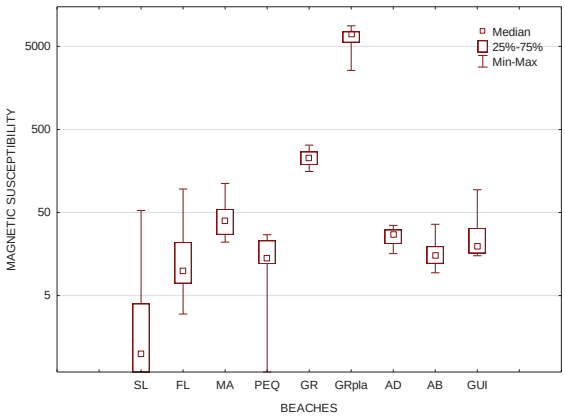


Fig. 2. Values of median, quartiles 25 and 75 % and extremes maximum and minimum relatively to the magnetic susceptibility. The values of magnetic susceptibility are expressed in logarithmic scale (SL – São Lourenço, FL – Foz do Lizandro, MA – Maçãs, PEQ – Pequena, GR – Grande, GRpla – Grande placer, ADA – Adraga, ABA – Abano, GUI – Guincho).

Table I. Mean, sorting and classification of the collected sediment from the studied beaches (values in φ units).

Beach	Mean and classification		Sorting and classification	
São Lourenço (SL)	-0.58	Very coarse sand	0.70	Moderately well sorted
Foz do Lizandro (FL)	0.53	Coarse sand	0.60	Moderately well sorted
Maçãs (MA)	0.48	Coarse sand	0.66	Moderately well sorted
Pequena (PEQ)	0.80	Coarse sand	0.34	Very well calibrated
Grande (GR)	0.92	Coarse sand	0.37	Well sorted
Grande placer (GRpla)	1.53	Medium sand	0.49	Well sorted
Adraga (ADA)	0.83	Coarse sand	0.37	Well sorted
Abano (ABA)	0.84	Coarse sand	0.37	Well sorted
Guincho (GUI)	0.76	Coarse sand	0.42	Well sorted

4. DISCUSSION

The mineralogical composition of a sedimentary deposit as the one of Grande beach is a direct consequence of source and distribution processes. The presence of the Sintra Igneous Complex (essentially formed by granites, syenites and gabbros) together with some scattered outcrops of the Lisbon Volcanic Complex (essentially formed by basalts and similar rocks) on the studied area make a sharp geological contrast with the major sedimentary rocks outcrops made of limestones, sandstones and mudstones (Berthou, 1973; Palácios, 1985; Leal, 1990; Miranda, 2010). Hypothetically this geological contrasts could create good conditions for the existence of evident mineralogical contrasts on the analyzed beach sediments. However, on the studied sediments, the heavy mineral assemblage is very homogenous despite the existence of the referred geological contrasts (Figure 3). The only exception to this setting is the composition of the 2 samples collected at Grande beach, that show a high concentration of heavy minerals (Table II) and high values of magnetic susceptibility (Figure 2) revealing, a major presence of opaque minerals (ilmenite and magnetite) associated with the significant presence of GAR, STA and ZIR as transparent minerals (Figure 3). These minerals have relatively high densities (ranging between 3.8 and 5.1). This means that Grande beach's specific mineralogical may be related with specific particle sorting processes that promote the concentration of the heavier particles on beach face (particle sorting by density). This coastal stretch belongs to a wider sedimentary cell where the littoral drift has a southward resultant direction (Ribeiro et al., 2014). In this coastal stretch the presence of sandy beaches is often link to the presence of river mouths where the existence of rock headlands is determinant on the beach configuration. The retention of the sand on these beaches is normally associated with the presence of a rock promontory that acts as a natural barrier to the downdrift (southward) sand transport. At Grande beach the existence of a rock promontory named as "Calhau do Corvo" made by stratified compact limestone rocks with an approximately W-E direction (perpendicular to the longshore direction) and dipping about 80º to north create, at this site, a natural barrier of remarkable dimensions to the drowndrift sand transport.

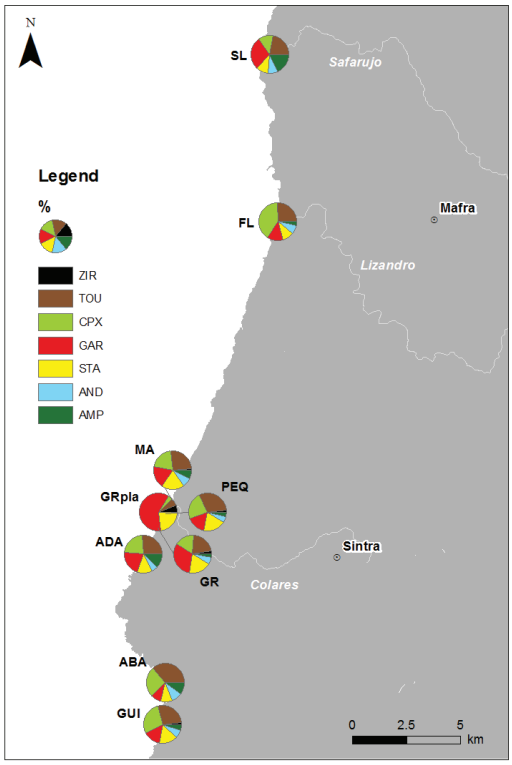


Fig. 3. Distribution pattern of the main transparent heavy minerals on the 8 studied beaches. ZIR – zircon, TOU – tourmaline, CPX – clinopyroxene, GAR – garnet, STA – staurolite, AND – andalusite, AMP – amphibole SL – São Lourenço, FL – Foz do Lizandro, MA – Maças, PEQ – Pequena, GR – Grande, GRpla – Grande placer , ADA – Adraga, ABA – Abano, GUI- Guincho.

This setting promotes the development of an encased beach where sediment transposition is only possible at beach terrace or submarine beach. Since the heavy minerals are pushed onshore they remained trapped at the upper beach. The dimensions of the headland are large enough that beach encasing is sufficient to retain the heavy minerals even during large storms. Thus Grande beach acts as a "filter" for the sediments that are transported by littoral drift promoting the heavy mineral concentration by the selective offshore transport of the light minerals. This process is continuous in time and is responsible for a progressive enrichment of heavy mineral concentration at a time scale of centuries or even millennia. When the major storms occurred the effect of the selective process is boosted resulting in the formation of a sand deposits that are very rich on

heavy minerals (placer of heavy minerals). The formation of this kind of deposits it is referred in several papers (e.g. Rao, 1957; Komar and Wang, 1984; Cascalho and Taborda, 2006) that describe the specific conditions that allow the sand particles selection according to their sizes and densities (Kudrass, 1987).

5. CONCLUSIONS

This work describes the mineralogical composition of several beaches of the Portuguese west coast, located between São Lourenço and Guincho. The mineralogical composition of the studied beaches is quite similar. The exceptions correspond to the 2 samples collected from Grande beach which contain the higher values of the magnetic susceptibility and heavy mineral weight percentage. These values are consistent with a heavy mineral assemblage dominated by an opaque suite composed by ilmenite, magnetite and hematite and a transparent suite dominated by garnet, staurolite and zircon. These results are interpreted as a consequence of particle selective processes that are very efficient on the Grande beach due to its particular geomorphological setting.

REFERENCES

Beach Sand Code Project (2012). Beach sediment sampling and processing guidelines. Relatório técnico do projecto "Beach Sand Code", 9p., disponível em http://sandcode.fc.ul.pt/References/sampling%20guidelines.pdf.

Berthou, P. Y. (1973). Le Cénomanien de l'Estremadure portugaise. *Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal*, N. S. 23, 169 p.

Cascalho, J., Taborda, R. (2006). Heavy mineral placer formation: an example from Algarve, Portugal. *Journal of Coastal Research*, SI 39, 246-249.

Komar, P. D., Wang, C. (1984). Processes of Selective Grain Transport and the Foramtion of Placers on Beaches. *The Journal of Geology*, 92, 637-655.

Komar, P. D. and Li, M. Z. (1991). Beach placers at the mouth of the Columbia River, Oregon and Washington. *Marine Mining*, 10, 171-187.

Kudrass, H. R. (1987). Sedimentary models to estimate the heavy-mineral potential of shelf sediments. In *Marine Minerals*, P. G. Teleki et al. (eds.), 39-56.

Leal, N. F. G. (1990). O maciço eruptivo de Sintra. Novos dados de natureza petrográfica e geoquímica. Dissertação no âmbito das Provas de Aptidão Pedagógica e Científica. Dep. Geol. Fac. Ciên. Univ. Lisboa, 49 pp.

Mange, M.A., H.F.W. Maurer, H. F. W. (1992). *Heavy minerals in Colour*. Chapman and Hall, London, 147 pp.

Matos Alves, C. A., (1964). Estudo petrológico do maciço eruptivo de Sintra. *Revista da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, 2.a Série, C, XII (2), 124-289.

Miranda, R. M. L. (2010). *Petrogenesis and Geochreonology of the Late Cretaceous Alkaline Magmatism in the West Iberian Margin*. Dissertação de doutoramento. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 367 pp.

Palácios, T. (1985). *Petrologia do Complexo Vulcânico de Lisboa*. Dissertação de doutoramento. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 290 pp.

Rao, C. B. (1957). Beach erosion and concentration of heavy minerals sands. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 143-147.

Ribeiro, M., Taborda, R., Rodrigues, A., Silveira, T. (2014). Insights on sediment bypassing at headland-bay beaches: an exemple at the Portuguese west coast. Resumo alargado de comunicação apresentada nas 3.as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Instituto Hidrográfico, Lisboa. *Actas das 3.as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, 301-304.

Rocha, F. (1993) - "Argilas Aplicadas a Estudos Litoestratigráficos e Paleoambientais na Bacia Sedimentar de Aveiro". Dissertação Doutoramento. Univ. Aveiro, 399 p.

Análise morfo-sedimentar da cabeceira do canhão de Aveiro

N. Lapa (1), A. Rodrigues (1), F. Marques (2)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa, Portugal; nuno.lapa@hidrografico.pt.

(2) Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia e Instituto D. Luiz.

Resumo: O canhão de Aveiro, localizado a cerca de 50 km ao largo de Aveiro, tem uma morfologia peculiar que o faz destacar dos restantes canhões ibéricos, nomeadamente pela sua ampla cabeceira, dissecada por uma rede de numerosos tributários. No âmbito do projeto DEEPCO foram adquiridos, entre 2007 e 2008, um vasto conjunto de dados geofísicos e sedimentológicos, ainda por explorar. É objectivo deste trabalho, iniciar a interpretação destes dados, através da análise morfológica da cabeceira do canhão e sistematizar o conhecimento existente sobre os depósitos sedimentares presentes nas zonas envolventes ao canhão.

Palavras-chave: canhão submarino de Aveiro, sedimentos superficiais, bordo da plataforma.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O bordo da plataforma está materializado por uma rutura de declive importante, que assinala também a fronteira entre dois domínios bastante distintos, quer em termos morfológicos, quer em termos sedimentares: a plataforma e a vertente continental. Do ponto de vista morfológico, a vertente é bastante irregular e encontra-se, normalmente, entalhada por vales, ravinas e canhões (figura 1).

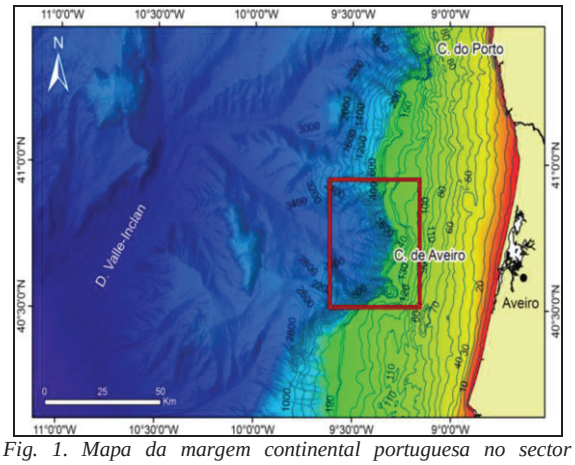


Fig. 1. Mapa da margem continental portuguesa no sector estudado e localização do cursos superior do Canhão Submarino de Aveiro (a vermelho). (MDT extraído de http://portal.emodnet-bathymetry.eu/).

No caso da margem portuguesa encontram-se notáveis exemplos dessa diversidade morfológica, nomeadamente canhões submarinos (Vanney & Mougenot, 1981). De origem variável, e nem sempre apresentado uma associação próxima com os grandes sistemas fluviais do continente, é inegável que os vales e canhões submarinos constituem estruturas extremamente dinâmicas, por onde correntes fortes e grandes volumes de partículas (Guerreiro, 2006), promovendo a rápida transferência de material entre a zona costeira e a planície abissal.

O presente trabalho tem como objetivo a análise geomorfológica do curso superior do Canhão Submarino de Aveiro, e sua interpretação face ao conhecimento existente sobre a plataforma continental adjacente (figura 1).

2. DADOS E MÉTODOS

A análise morfológica do canhão foi efetuada por interpretação direta do modelo digital de terreno (MDT), criado a partir de sondagem hidrográfica, utilizando um *software* de Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Os dados tratados neste trabalho foram adquiridos no âmbito do projeto DEEPCO ("*Deep Sedimentary conduits of the portuguese margin*"– POCTI/CTA /46367/2002) entre 2007 e 2008 (figura 2).

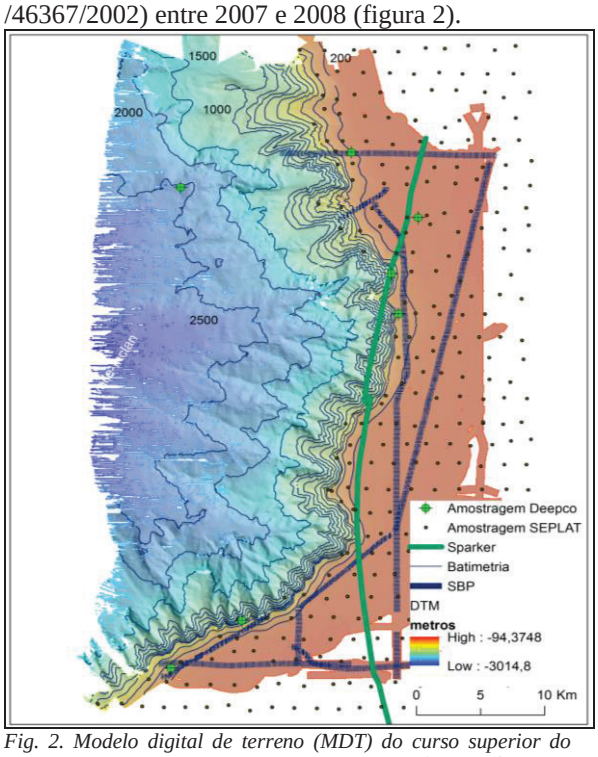


Fig. 2. Modelo digital de terreno (MDT) do curso superior do Canhão de Aveiro, com localização dos perfis de sísmica e amostragem superficial.

Os dados de batimetria foram adquiridos com o sondador multifeixe EM710 e os perfis de reflexão sísmica com o sistema *Sub-bottom profiler* (SBP). Foram ainda colhidas 7 amostras superficiais de sedimentosque vieram complementar 79 amostras superficiais de sedimentos pertencentes ao programa SEPLAT ("*Cartografia dos depósitos sedimentares da plataforma continental portuguesa*"), colhidas entre 1989 e 1991. Foi ainda interpretada uma linha sísmica obtida em 1989 com o sistema *Sparker*.

A realização de produtos específicos, tais como perfis batimétricos e mapas de pendores, permitiu consubstanciar a interpretação geomorfológica e sedimentar realizadas com base nos dados e amostras atrás descritos.

3. ENQUADRAMENTO GEOMORFOLÓGICO E GEOLÓGICO

O canhão de Aveiro localiza-se a cerca de 50 km da costa portuguesa, ao largo de Aveiro (figura 1). A cabeceira situa-se abaixo dos 110 m de profundidade e o canhão desenvolve-se por mais de 150 km, pela Depressão de Valle-Inclán, até desembocar na Planície Abissal Ibérica às profundidades de 4000 m. O canhão encontra-se embutido num setor da plataforma continental caraterizado por uma morfologia muito monótona e pendor muito suave da ordem dos 0,3 %. A cabeceira do canhão é muito ampla, com cerca de 60 km de comprimento e encontra-se dissecada por uma densa rede de pequenos vales tributários de menores dimensões. Relativamente ao tipo de bordo, Mougenot (1989) classifica o bordo da plataforma, deste troço da margem, como sendo agradante. Geologicamente, a a estrutura da plataforma continental é caraterizada por forte controle estrutural. Rodrigues (2004) refere a presença de falhas rotacionais de deslizamento gravitacional, formadas durante o *rifting* do Mesozóico, e a colmatação das depressões estruturais por um espesso corpo sedimentar terciário (formações detríticas e calcárias bioclásticas do Eocénico e Neogénico).

Dada a distância que separa o canhão do continente, não parece haver uma relação genética entre o canhão e algum curso fluvial principal atual. Segundo Rodrigues (2004), o Canhão de Aveiro deve a sua origem está relacionada com uma falha de desligamento direito com direcção WNW-ESE, com componente de movimentação normal e abatimento do bloco Norte. De acordo com o proposto, esta estrutura, delimita dois domínios diferentes da plataforma continental: um bloco setentrional com estrutura em monoclinal dominada pela direção NW-SE a NNW-SSE; e um bloco Sul, com evidências de deformação mais dúctil. É provável que a falha mencionada, formada durante a orogenia varisca e reactivada nos impulsos posteriores, tenha desempenhado um papel importante na modelação do canhão (Rodrigues, 2004).

4. RESULTADOS

4.1. Análise morfológica do canhão

Com os dados do levantamento batimétrico do canhão, realizado entre os 95 m e os 3000 m de profundidade, modelou-se a superfície do fundo resultando num MDT representativo do sistema do canhão (figura 2) e produziu-se um mapa de declives (figura 3).

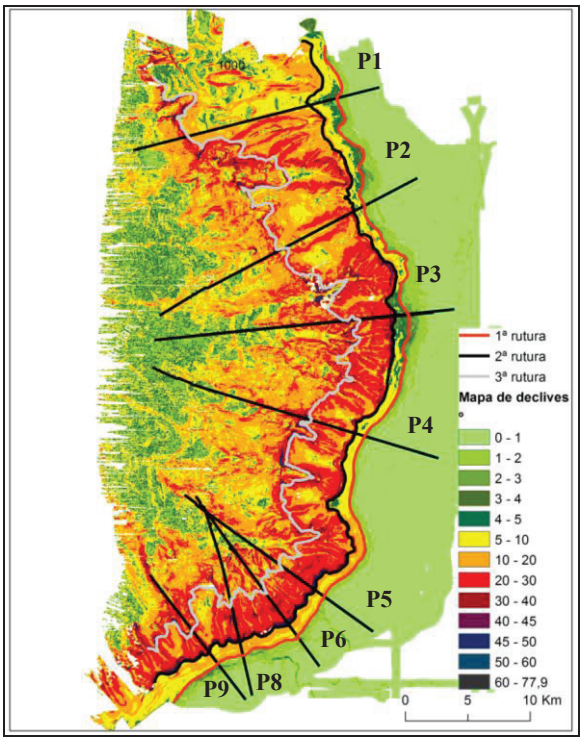


Fig. 3. Mapa de declives, obtido a partir do MDT, com os três ressaltos assinalado.

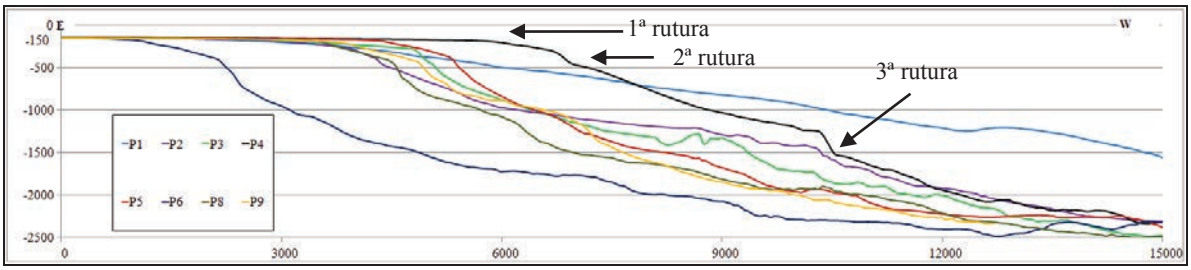


Fig. 4. Perfis batimétricos representativos da morfologia interna do curso superior do canhão de Aveiro, realizados a partir da cota 150 m (unidades em metros) Indicadas as 3 ruturas no perfil 4.

Através da avaliação das orientações das faces das vertentes dos vales do canhão, observou-se que, no sector Norte, a maioria das faces das vertentes está orientada entre 225 e 270º, verificando-se, no sector Sul, uma rotação ligeira para NW, assumindo valores a variar entre as direções 270 e 359º.

A observação do mapa de declives (figura 3) permite destacar: 1) o entalhamento da cabeceira do canhão na superfície quase horizontal da plataforma continental; 2) a inclinação muito suave da plataforma (<1º), sendo que a vertente do canhão apresenta valores de pendor a variar entre 10º e 30º; 3) as diferenças na inclinação geral da vertente, com a presença de três ruturas de declive nítidas.

O primeiro ressalto identificado (assinalado a vermelho na figura 3) corresponde ao bordo da plataforma continental (o declive médio <1º passa, bruscamente, para valores superiores a 4-5º, a Norte e a 10º, a Sul do canhão); o segundo ressalto (assinalado a preto na figura 3) é caraterizado pelo aumento acentuado do declive que passa para valores entre os 10º e os 40º, medidos à profundidade média de 315 m no sector setentrional, e entre os 30º e os 50º, medidos na batimétrica dos 410 m no sector meridional. A distância projetada entre os dois primeiros ressaltos não é constante ao longo do canhão, constatando-se que há um aumento significativo de Sul para Norte, sendo o seu valor médio de 800 m. A mesma observação é realizada a partir da análise dos perfis transversais do canhão: os perfis P1, P2 e P3, localizados a Norte, têm um declive menos acentuado do que os perfis P4 a P9 localizados a Sul do eixo principal do canhão (figura 4). O terceiro ressalto (assinalado a cinza na figura 3), ocorre perto dos 1300 m de profundidade, a Sul, e entre as profundidades de 1500 a 1600 m a Norte do canhão, e corresponde a um aumento do declive médio do fundo, para valores da ordem dos 45-60º.

A localização e as diferentes inclinações das superfícies morfológicas poderão ser explicadas pelas diferentes resistências das formações meso-cenozóicas, identificadas na estrutura geológica da área envolvente (Mougenot, 1989; Rodrigues, 2004), ao desgaste causado pelos agentes de erosão marinha.

4.2. Cobertura sedimentar

A cobertura sedimentar encontrada junto ao canhão de Aveiro é, no geral, grosseira, dominada por areia e cascalho (IH, 2010). Verifica-se um aumento da fração silto-argilosa a partir dos 300 m de profundidade, e em especial abaixo dos 480 m, onde a fração de argila atinge alguma relevância, com teores até 45 % (Guerreiro, 2007). As 7 amostras superficiais colhidas posteriormente, na zona do canhão, confirmam a predominância da fração arenosa junto ao bordo da cabeceira (atingindo os 90%), e o aumento da fração silto-argilosa com a profundidade (abaixo dos 500 m). Trabalhos de maior detalhe, realizados por Magalhães (2001), permitiram individualizar dois depósitos sedimentares distintos, utilizando apenas critérios texturais: 1) depósitos arenosos do bordo da plataforma e vertente continental superior, que cobrem quase toda a zona da cabeceira do canhão; 2) depósitos lodosos da vertente continental superior, localizados pontualmente junto ao bordo, entre os perfis P6 e P8 a Sul, e entre os perfis P2 e P3 a Norte.

As análises composicionais realizadas por Magalhães (2001) permitiram constatar que os depósitos arenosos são constituídos essencialmente por areia, com forte componente biogénica e baixo teor em cascalho e partículas finas. Neste depósito foi possível distinguir duas unidades distintas: a) depósito com taxas de sedimentação que variam entre 0,4 e 1,0 mm/ano (Carvalho e Ramos,1990), composto por partículas recentes, constituídas por uma maior percentagem de quartzo brilhante e anguloso; b) depósito relíquia, bastante rico em glaucónia (presente nas carapaças de foraminíferos, e constituindo moldes internos), com taxas de sedimentação muito pequenas ou nulas (Magalhães, 2001).

De acordo com este último autor, os depósitos lodosos da vertente continental superior, constituídos maioritariamente por partículas finas, podem incluir alguma componente cascalhenta (predominantemente biogénico), e em areia (fina a muito fina com calibragem variável e assimetria negativa), constituída por uma quantidade significativa de micas e em que a glaucónia chega a atingir cerca de 20% da sua fração. Às profundidades a que ocorrem (profundidades superiores a 300 m), os depósitos com estas caraterísticas indiciam baixas condições energéticas compatíveis com a deposição das partículas mais finas. A presença de frações mais grosseiras e as caraterísticas composicionais das mesmas sugere, no entanto, a ocorrência de movimentações gravíticas pontuais que promovem a transferência dos depósitos arenosos localizados a menores profundidades para as áreas mais profundas. As taxas de sedimentação para os depósitos lodosos rondam, em média, os 1,8 mm/ano (Carvalho e Ramos, 1990).

Segundo o mapa de espessuras proposto por Rodrigues (2004), a zona mais externa da plataforma continental é muito escassa em cobertura sedimentar recente, não ultrapassando os 2 m. Este facto foi confirmado nos perfis de reflexão sísmica existentes na área e representados na figura 2, os quais revelam ainda a ocorrência de zonas com cobertura sedimentar mais significativa em áreas protegidas do interior do sistema de canhão.

5. DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

As caraterísticas morfológicas e sedimentares do canhão de Aveiro não são compatíveis com o fornecimento atual de partículas arenosas e cascalhentas oriundas do continente emerso adjacente. Assim sendo, a presença destas partículas terá de estar associada a processos antigos, compatíveis com a proximidade da zona litoral.

De acordo com Dias *et al.* (1997) e Rodrigues (2004), em períodos de baixo nível do mar (tal como o ocorrido durante o Último Máximo Glaciário (UMG) há 18 000 anos), a cabeceira do canhão estaria muito próxima da linha de costa que, na altura, se encontrava 135 m abaixo da cota atual (figura 5). Nesta altura as condições climatéricas potenciavam uma capacidade de erosão e de transporte da rede fluvial terrestre muito superior à do presente (Rodrigues, 2004). Estavam assim criadas as condições para o fornecimento e deposição de sedimentos grosseiros de origem continental junto à cabeceira do canhão e este captaria os sedimentos fluviais transportados pela rede de drenagem que, em face das condições climatéricas tinham uma capacidade de erosão e de transporte muito superior à presente (Rodrigues, 2004). A reconstituição paleogeográfica da rede de drenagem e do (paleo)litoral arenoso feita por aquele autor, e representada na figura 5, permite constatar a grande continuidade entre as linhas fluviais principais e os principais vales do canhão.

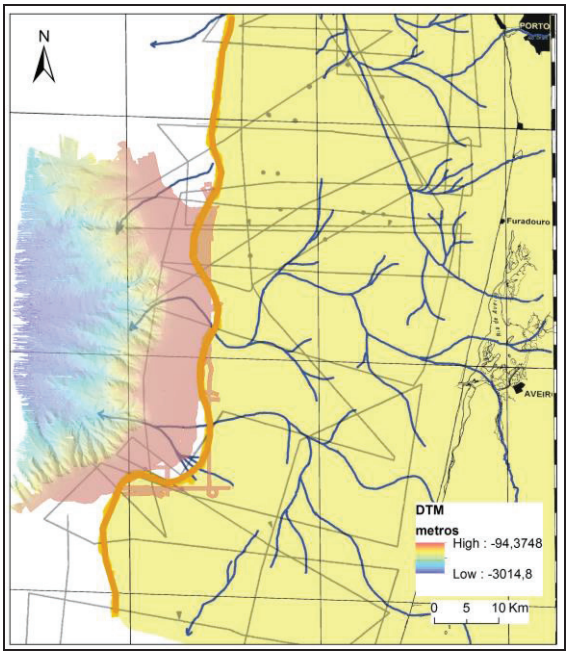


Fig. 5. Reconstituição paleogeográfica da rede de drenagem (linhas a azul) e do paleolitoral arenoso (linha grossa a amarelo torrado) durante o último Máximo Glaciário (18 000 anos), quando o nível médio do mar se encontrava a 135 m abaixo da cota actual. (adaptado de Rodrigues, 2004).

A reduzida espessura de cobertura sedimentar na zona envolvente e no interior do canhão, bem o caráter erosivo da cabeceira, indicam que os processos de dinâmica sedimentar actuais se caracterizam por um *deficit* de fornecimento de partículas recentes de origem continental (partículas grosseiras). Os processos de dinâmica sedimentar atuais serão dominados pela transferência de partículas finas para a vertente continental, não se registando deposição significativa de sedimentos no interior do canhão. De fato, os vestígios de escorregamentos, visíveis na morfologia, são muito reduzidos e encontram-se associados à dinâmica própria do sistema de vales do canhão.

REFERÊNCIAS

Carvalho, F. P.; Ramos, L.A. (1990). Lead-210 chronology in marine sediments from the Northern continental margin of Portugal. *2º Cong. Qualidade do Ambiente*, A143-A151.

Dias, J. M. A., Rodrigues, A., Magalhães, F. (1997). Evolução da linha de costa, em Portugal, desde o último máximo glaciário até à actualidade: Síntese dos conhecimentos. *APEQ Lisboa*, 53-66.

Guerreiro, C. Duarte, J., Rodrigues, A., Taborda, R. (2006). Os Enigmáticos Canhões Submarinos da Plataforma Continental Portuguesa, Resultados Preliminares do Projecto DEEPCO. *Anais do Instituto Hidrográfico*, 169-182 pp.

Guerreiro, C., Rodrigues, A., Duarte, J., Oliveira, A., Taborda, R. (2007). Bottom Sediment Signature Associated With The Oporto, Aveiro And Nazaré Submarine Canyons (NW Off Portugal). *Thalassas.* 9-18 pp.

IH, 2010 – *Sedimentos superficiais da plataforma continental. Folha SED2 (Espinho ao Cabo Mondego)*, esc. 1:150000, 1ª Edição.

Magalhães, F. (2001). Os Sedimentos da Plataforma Continental Portuguesa: contrastes espaciais, perspectiva temporal, potencialidades económicas. *Doc. Técnicos do IH*, 34. 287 pp.

Mougenot, D. (1989). Geologia da margem Portuguesa. *Doc. Técnicos do IH*, 32, 259 pp.

Rodrigues, A. (2004). Tectono-Estratigrafia da Plataforma Continental Setentrional Portuguesa. *Doc. Técnicos do IH*, 33. 244 pp.

Vanney, J.; Mougenot, D. (1981). La plate-forme continentale du Portugal et les provinces adjacentes: analyse géomorphologique". *Mem. Serv..Geol. Portugal*, 28, 145 pp.

http://portal.emodnet-bathymetry.eu/

Caraterização remota da cobertura sedimentar do fundo marinho do arquipélago da Madeira através de dados de retrodispersão acústica - Resultados preliminares do Programa SEDMAR

R. Santos (1), A. Rodrigues (1), R. Quartau (1) e C. Monteiro (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa; ruben.santos@hidrografico.pt

Resumo: Neste trabalho são apresentados os primeiros mosaicos de alta resolução do sinal de retrodispersão acústica normalizado usados na caraterização remota do fundo marinho, no âmbito do Programa SEDMAR. Os resultados preliminares permitiram a determinação do diâmetro médio dos sedimentos nas plataformas e flancos superiores das ilhas da Madeira, Desertas e Porto Santo, com base nos valores de retrodispersão acústica e sugerem que estas zonas são bastante deficitárias em sedimentos finos, estando cobertas, de uma forma geral, por depósitos muito grosseiros (cascalhos e areias). Os resultados das análises granulométricas de cerca de 500 amostras colhidas nas plataformas a sul das ilhas da Madeira e Porto Santo confirmam essa classificação.

Palavras-chave: retrodispersão acústica, caracterização remota, sedimentos, arquipélago da Madeira.

1. INTRODUÇÃO

O programa SEDMAR (SEDimentary cover of the Madeira Archipelago), foi iniciado em 2013 no Instituto Hidrográfico (IH) e tem como principal objetivo contribuir para o conhecimento e cartografia da natureza geológica dos fundos oceânicos e do ecossistema marinho das margens insulares do arquipélago da Madeira (Fig. 1).

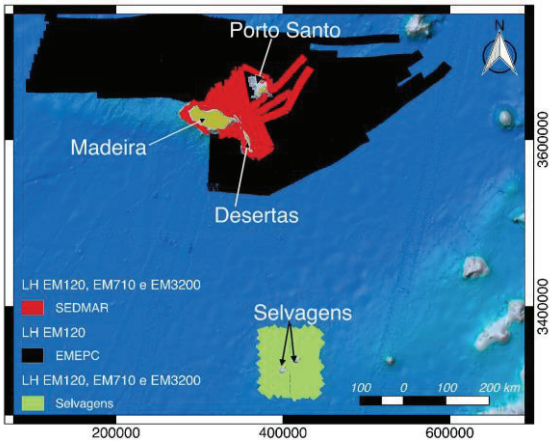


Fig. 1. Localização do arquipélago da Madeira e identificação da origem dos dados indicados nos polígonos de cobertura. Imagem de fundo constituída pela batimetria General Bathymetric Chart of Ocean (GEBCO). Datum WGS84 projeção UTM 28N.

É objetivo do trabalho presente, a apresentação dos primeiros mapas da distribuição do tamanho médio das partículas sedimentares que se encontram na margem insular, obtidos através da técnica ARA - *Angular Range Analysis* e da normalização dos dados de retrodispersão acústica (Fonseca e Mayer, 2007).

2. ORIGEM DOS DADOS

No presente, o IH tem sondadores multifeixe que permitem cobrir toda a gama de profundidades, desde as águas pouco profundas até às zonas oceânicas. Para este trabalho foram utilizados dados adquiridos pelos sondadores da Kongsberg EM120, EM710 e EM3002 (Tabela I). Estes dados encontram-se descritos nas seguintes subseções.

Tabela I. Parâmetros dos sondadores multifeixe.

	EM120	**EM710**	**EM3002**
Freq.(kHz)	12	70 - 100	293, 300, 307
Sondas/impulso	191	200 - 400	254 -508
Largura do feixe	2º x 2º	1º x 2º	1.5º x 1.5º
Faixa sondada	120 º	120º	120º
Alcance (m)	50 - 11000	3 - 2000	1 – 120

2.1. Grandes profundidades (EM120)

O sondador multifeixe EM120 foi utilizado para adquirir dados para as áreas de maior profundidade, nos levantamentos hidrográficos (LH) realizados pelos NRP "D. Carlos I" e NRP "Alm. Gago Coutinho". O primeiro navio foi utilizado entre os anos de 2006 a 2007, na aquisição de dados para a Estrutura de Missão para a Extensão da Plataforma Continental (EMEPC) em redor das ilhas da Madeira, Desertas e Porto Santo (Fig. 1 – Polígono de cor preta). Por sua vez, o NRP "Alm. Gago Coutinho" foi utilizado nos anos de 2009, 2013 e 2014 na aquisição de dados em redor das ilhas Selvagens (2009, Fig. 1 – Polígono de cor verde), Madeira, Desertas e Porto Santo (2013 e 2014, Fig. 1 – Polígono de cor vermelha).

2.2. Profundidades intermédias (EM710)

As zonas com profundidades entre os 50 e os 1000 m foram cobertas através do sondador da *Kongsberg* EM710, instalado no NRP "Alm. Gago Coutinho". Este sondador foi utilizado em todos os LH realizados, nos últimos anos, nas ilhas que constituem o arquipélago da Madeira. Nas ilhas Selvagens em 2009 (Fig. 1 – área inscrita no polígono de cor verde) e nas ilhas da Madeira,

Desertas e Porto Santo em 2013 e 2014, no decorrer do programa SEDMAR (Fig. 1 – área inserida no polígono de cor vermelha).

2.3. Baixas profundidades (EM3002)

Em 2008 foi realizado um LH na plataforma sul de Porto Santo, por solicitação do Governo Regional da Madeira (GRM), com o sondador multifeixe da Kongsberg EM3002 instalado na embarcação "Gaivota".

Em 2009, no decorrer do LH nas ilhas Selvagens, já referido anteriormente, também foi utilizado o sondador EM3002 para sondar uma parte da plataforma insular destas ilhas.

2.4. Amostragem sedimentar

No arquipélago da Madeira existiram três trabalhos para o GRM onde foram colhidas aproximadamente 500 amostras de sedimentos superficiais do fundo marinho com um colhedor do tipo *Smith McIntyre*. Este colhedor permitiu a colheita de sedimentos superficiais até ~20 cm de profundidade abaixo do fundo mar e o posicionamento da amostragem foi garantido com o sistema GPS da embarcação em modo diferencial (DGPS). No entanto, das 500 amostras foram utilizadas apenas 74 amostras para a região sul da ilha da Madeira e 96 para a região sul da ilha de Porto Santo, devido à sobreposição com os LH.

3. METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho foi desenvolvida ao longo dos últimos anos e está descrita em Santos e Rodrigues (2015). Nos pontos seguintes é apresentada uma descrição resumida da mesma.

3.1. Processamento dos dados batimétricos

Os dados registados pelos sondadores multifeixe são utilizados, numa primeira fase, para obter a superfície batimétrica da área a caraterizar, mas também para realizar o processamento dos dados de retrodispersão. O processamento dos dados batimétricos foi realizado através do algoritmo CUBE - *Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator*, desenvolvido por Calder (2003) que se encontra implementado na aplicação CARIS HIPS & SIPS. A superfície batimétrica validada que resulta deste algoritmo é utilizada no processamento do sinal de retrodispersão, para permitir a determinação do ângulo de incidência dos feixes no fundo marinho.

3.2. Processamento do sinal de retrodispersão

Os dados brutos do LH são processados com a ferramenta *Fledermaus Geocoder Toolbox* (FMGT), através da aplicação de diversas correções radiométricas e geométricas (ganhos, intensidade da fonte, a forma de feixe do sondador; a correção das perdas ao longo do trajeto do sinal e respetiva área sonorizada). A normalização do sinal de retrodispersão é obtida através dos processos de georreferenciação, *despeckle* e a aplicação de um AVG – *Angular Varying Gain* (Lurton e Lamarche, 2015).

A correção da forma do feixe foi apenas determinada para os sondadores EM3002 e EM710, devido à cobertura de amostras de sedimentos ter sido feita apenas em áreas abrangidas por estes dois sondadores. A falta de amostras de sedimentos a grandes profundidades impossibilitou a determinação da forma do feixe para o sondador EM120. A imagem obtida após a aplicação de todas as correções, permite reconhecer os diferentes depósitos sedimentares.

A técnica ARA implementada na ferramenta FMGT, permite a caraterização remota do fundo marinho através da inversão do modelo de resposta acústica desenvolvido pelo *Applied Physics Lab - University of Washington* (Jackson, 1994). A estimação do diâmetro do grão, por esta técnica, está limitada aos valores compreendidos entre -1ϕ a 9ϕ, sendo que $\phi=-\log_2(d)$, escala definida por Krumbein (1938), onde d é o diâmetro do grão em mm.

O valor estimado para o diâmetro do grão é normalmente designado por diâmetro médio do grão, devido ao sinal registado no sondador corresponder à retrodispersão provocada pela área sonorizada da superfície do fundo e pelo volume correspondente à penetração do sinal no sedimento. Esta técnica foi aplicada apenas nos dados dos sondadores EM3002 e EM710 que cobrem parte da plataforma e flancos superiores das ilhas da Madeira, Desertas e Porto Santo. Nestes locais, devido à existência de amostras para a determinação da correção da forma do feixe foi possível validar os resultados da caraterização remota por comparação com os resultados laboratoriais das amostras.

3.3. Colheita de sedimentos e análise granulométrica

As amostras de sedimentos e respetiva análise granulométrica desempenham duas funções distintas: a) determinação da correção à forma do feixe, de forma a calibrar a resposta acústica com o tipo de fundo; b) na avaliação do rigor da caraterização remota realizada com a aplicação do modelo.

A análise granulométrica de cada amostra de sedimentos foi realizada com a combinação do método da difração laser (fracção cujas partículas têm dimensões inferiores a 500 µm) e do método clássico da peneiração (fracção da amostra cujas partículas têm dimensões superiores a 500 µm). No final de cada ensaio, para além da curva granulométrica, foram calculados os respetivos parâmetros estatísticos.

4. RESULTADOS

4.1 Sinal de retrodispersão normalizado

Os mosaicos com o sinal de retrodispersão acústica normalizado, relativos aos dados adquiridos por cada sondador permitiram a construção de duas imagens diferentes (Fig. 2). Na Fig. 2-A estão representados os mosaicos dos diversos LH realizados em redor da ilha da Madeira, Desertas e Porto Santo e, na Fig.2-B estão representados os mosaicos obtidos com os dados adquiridos em redor das ilhas Selvagens. A interpretação das imagens permite identificar depósitos sedimentares distintos, bem como as estruturas vulcânicas que caraterizam a morfologia das ilhas. Estes tipos diferentes de fundos estão realçados por tons claros, devido à resposta acústica ser mais elevada, provocado pelo material mais grosseiro (p.ex. areias grosseiras e cascalho) ou material rochoso.

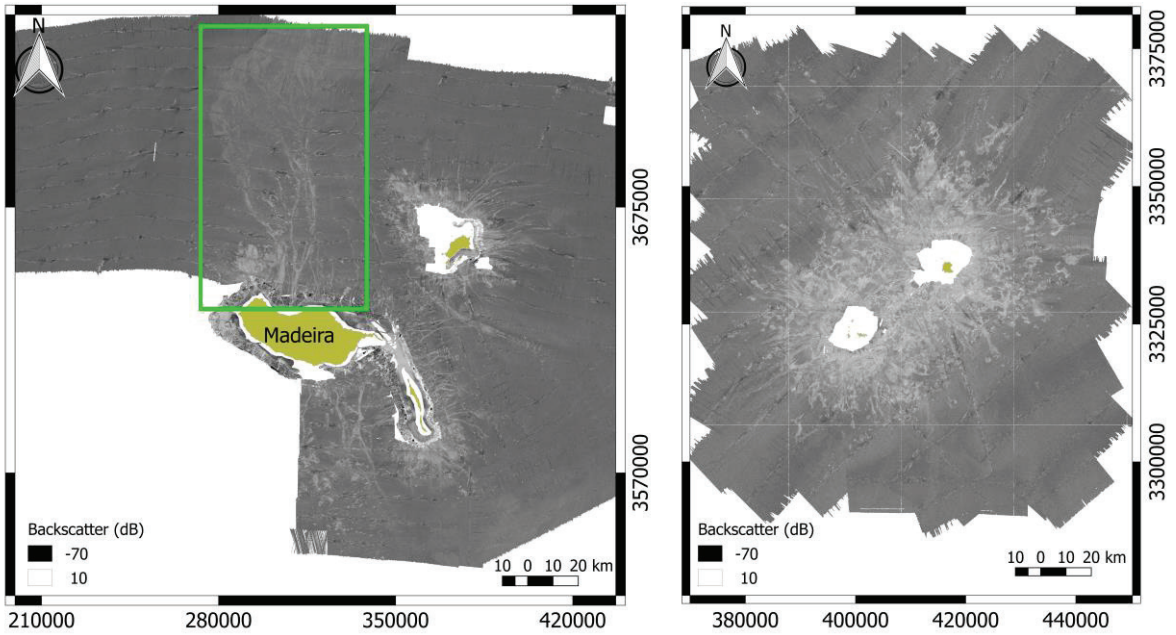


Fig. 2. Sinal de retrodispersão acústica normalizado de todos os LH existentes. A) Mosaico das ilhas Madeira, Desertas e Porto Santo; B) Mosaico das ilhas Selvagens.

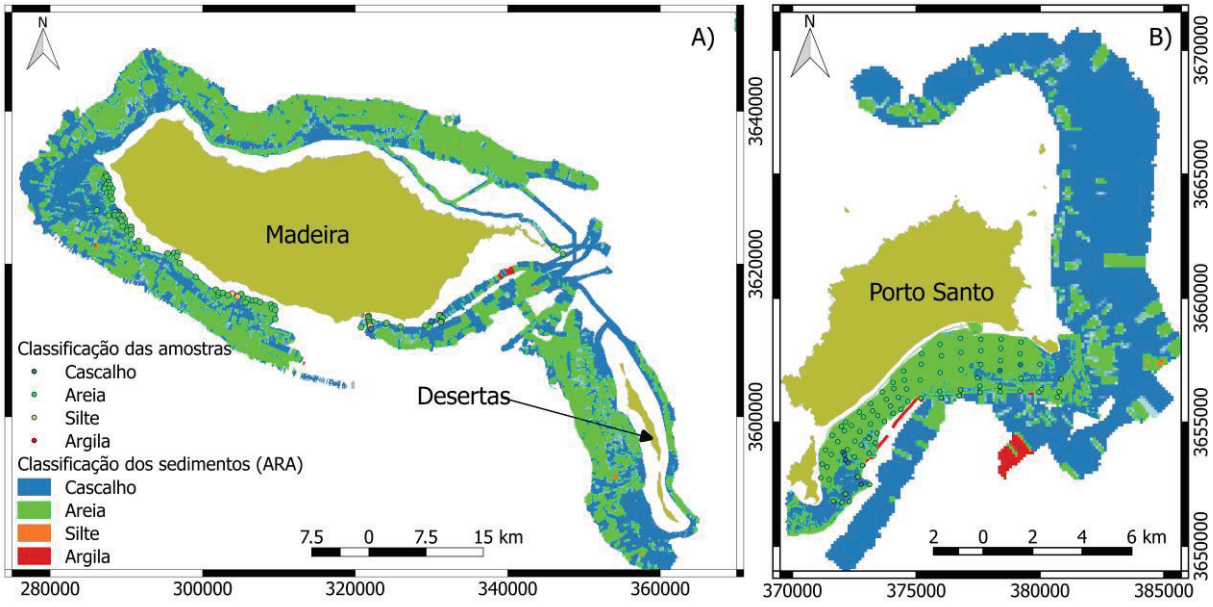


Fig. 3. Classificação obtida através do diâmetro médio do grão determinado pela técnica ARA para as ilhas da Madeira, Desertas e Porto Santo. Localização e classificação das amostras sedimentares com base na moda do diâmetro do grão.

Nas imagens (Fig. 2-A e 2-B) é perceptível a extensa e complexa rede de vales, de geometria mais ou menos radial, que caraterizam os flancos dos edifícios vulcânicos (Quartau *et al.*, 2016). A resposta acústica nas zonas abissais, é na sua maioria, homogénea e relativamente ténue, compatível com um ambiente de sedimentação mais calmo (provavelmente sedimentos pelágicos). No

entanto, na margem NW da Madeira identifica-se uma vasta área onde os canais se estendem por mais de 100 km (polígono de cor verde na figura 2 - A).

A resposta acústica parece indicar que o fundo está coberto por material mais grosseiro relativamente aos depositados nos fundos abissais. Da mesma forma, identificam-se outros sistemas de transferência de sedimentos a sul da Madeira e em redor das Desertas e Porto Santo que, transportam materiais mais grosseiros das zonas menos profundas para os fundos abissais destas ilhas.

4.2 Tamanho médio do grão

A técnica ARA foi aplicada apenas aos dados de retrodispersão acústica adquiridos pelos sondadores EM3002 e EM710 nas plataformas e taludes superiores a sul das ilhas da Madeira, Desertas e Porto Santo, onde existem amostras de sedimentos que permitem a determinação da forma do feixe, para cada sondador referido, e estimar o diâmetro médio do grão. O resultado final da determinação do diâmetro médio, obtido com a técnica ARA está representado na figura 3, bem como a localização das amostras de sedimentos e respetiva moda granulométrica.

No geral, os resultados obtidos pela técnica ARA, indicam que as plataformas e taludes superiores dessas ilhas são compostas por areias e cascalhos (< 4ϕ), sendo estes resultados bastante consistentes com os resultados granulométricos obtidos em laboratório. Algumas das divergências encontradas entre o valor estimado pela técnica ARA e o valor medido em laboratório (14% e 3% das amostras para as ilhas da Madeira e Porto Santos, respectivamente) prendem-se provavelmente com a exatidão do posicionamento das amostras de sedimentos. As zonas onde existem divergências coincidem com zonas de fronteira entre diferentes tipos de sedimento, o que indicia um erro de posicionamento da amostra, provavelmente associado à deriva do navio e/ou correntes que afastaram o colhedor da posição do navio.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram apresentados os resultados preliminares da caraterização granulométrica dos sedimentos com base nos valores de retrodispersão acústica do sinal emitido pelos sondadores EM3002 e EM710, operados durante os LH realizados pelo IH até à data no arquipélago da Madeira. A caraterização granulométrica dos sedimentos obtida apresenta grande consistência com a determinada por análises laboratoriais, apesar da cobertura espacial ser reduzida quando comparada com a área dos LH existentes.

Os resultados conseguidos, os quais apresentam uma grande robustez, são bastante promissores no que se refere à extrapolação da aplicação desta metodologia para as restantes áreas do arquipélago. É, no entanto, necessário fazer a calibração com colheitas de sedimentos adicionais nas áreas ainda não amostradas (ilhas Selvagens e Desertas, e a zonas norte das ilhas da Madeira e Porto Santo), para permitir a aplicação adequada do algoritmo ARA. Os novos trabalhos de aquisição de dados deverão ter em atenção o correto posicionamento das amostras de sedimentos, especialmente nos locais onde se espera uma maior variabilidade espacial (perto dos canais ou perto das estruturas vulcânicas aflorantes). Recomenda-se ainda, para atingir os resultados do programa SEDMAR, que sejam adquiridos dados batimétricos nos locais onde estes ainda estejam em falta e garantir uma maior sobreposição entre as fiadas do LH, de forma a evitar a diminuição da resolução dos resultados da técnica ARA.

As perspetivas futuras da investigação na área da caraterização remota do tipo de fundo, a realizar no âmbito do programa SEDMAR, passarão ainda pelo refinamento do processamento dos dados apresentados neste trabalho, nomeadamente no que se refere à descrição detalhada dentro da classe das areias.

REFERÊNCIAS

Calder, B. (2003). Automatic statistical processing of multibeam echosounder data. *The International hydrographic review*, 4(1).

Fonseca, L., e Mayer, L. (2007). Remote estimation of surficial seafloor properties through the application Angular Range Analysis to multibeam sonar data. *Marine Geophysical Researche*s, 28(2), 119-126.

Jackson, D. R. (1994). APL-UW high-frequency ocean environmental acoustic models handbook. *Applied Physics Laboratory, University of Washington, Technical Report*, 9407.

Krumbein, W. C. (1938) Size frequency distribution of sediments and the normal phi curve. *Journal of Sedimentary Petrology*, 7, 3-17.

Lurton, X., e Lamarche, G. (2015). Backscatter measurements by seafloor mapping sonars. Marine Geological and Biological Habitat Mapping. *A collective report by members of the GeoHab Backscatter Working Group*, (May), p. 200.

Quartau, R. Santos, R., Rodrigues, A., Monteiro, C. (2016). Erosional and sedimentary processes on the submarine flanks of Madeira archipelago: Preliminary results. *4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. (em publicação).

Santos, R. e Rodrigues, A. (2015). Caracterização remota dos sedimentos marinhos para fins de cartografia sedimentológica através do algoritmo Angular Range Analysis. *VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*.

Estimativa do tamanho médio das partículas sedimentares no canal de embocadura do rio Tejo através da técnica "Angular Range Analysis"

R. Santos (1), A. Rodrigues (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa; ruben.santos@hidrografico.pt

Resumo: Neste trabalho é apresentada a estimativa do diâmetro médio das partículas sedimentares através da aplicação da técnica acústica *Angular Range Analysis*, ao longo do canal de embocadura do rio Tejo, que faz ligação entre o oceano Atlântico e a bacia do estuário. É também apresentado o mosaico com o sinal acústico de retrodispersão normalizado, onde é possível observar a variação espacial dos depósitos sedimentares com uma resolução sem precedentes (~20cm). Esta zona é caracterizada no geral por fundos de cascalho e areias, existindo nalgumas zonas pequenos depósitos de siltes e argilas.

Palavras-chave: Retrodispersão, Angular Range Analysis, sedimentos, canal de embocadura, rio Tejo.

1. INTRODUÇÃO

O diâmetro do grão dos depósitos sedimentares é função da sua fonte (caraterísticas geológicas e grau de meteorização), meio de transporte e ambiente de sedimentação. Devido a isso, existem inúmeros estudos que utilizam o diâmetro dos sedimentos para inferir todos estes processos. Até há poucos anos, a distribuição espacial do tamanho dos grãos em ambientes sedimentares era determinada de forma direta. Implicava um processo de amostragem sedimentar, segundo uma malha mais ou menos densa conforme a variabilidade espacial do sistema estudado, e a posterior medição laboratorial do tamanho do grão. Recentemente, o desenvolvimento das técnicas de sondagem acústica e a capacidade de identificar, com maior resolução, as características do fundo, tornou o esforço de amostragem sedimentar bastante menor. A aplicação conjunta de técnicas de processamento do sinal acústico de retrodispersão, calibradas com algumas amostras de sedimentos, revelou ser uma metodologia inovadora e capaz de cartografar ambientes sedimentares de elevada hidrodinâmica onde decorrem processos complexos. Para demonstração desta capacidade, foi aplicada a técnica *Angular Range Analysis* na determinação do diâmetro médio das partículas sedimentares do canal de embocadura do rio Tejo (Fig. 1).

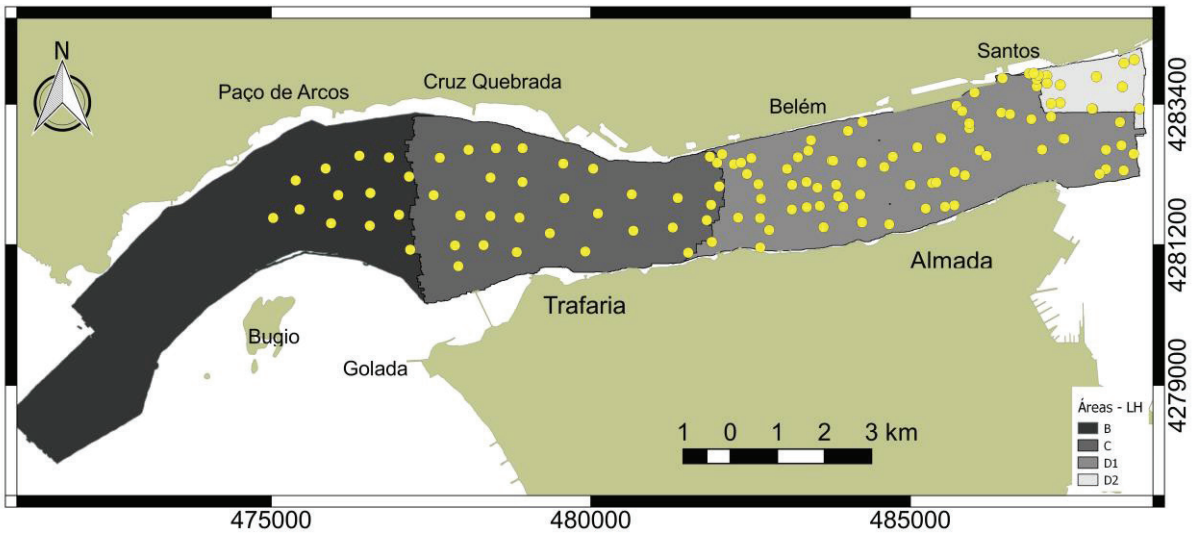


Fig. 1. Localização dos levantamentos hidrográficos e amostragem sedimentar (círculos amarelos).

2. DADOS

Os dados batimétricos utilizados neste trabalho foram adquiridos entre os anos de 2013 e 2015, em quatro levantamentos hidrográficos (LH) utilizando os sondadores multifeixe da *Kongsberg*: EM3002 e EM2040C (Fig. 1). O sondador EM3002 realizou os LH de novembro de 2013 (área B) e de fevereiro/março de 2015 (Área D1). As áreas C e D2

foram sondadas com o sondador EM2040C, em julho de 2014 e fevereiro de 2015, respetivamente.

As 155 amostras superficiais de sedimento utilizadas neste trabalho, foram adquiridas em 2009 e 2015, por um colhedor do tipo *Smith–McIntyre*. Após a colheita foram realizadas as análises laboratoriais necessárias para a obtenção das respectivas distribuições granulométricas e parâmetros estatísticos mais importantes.

3. METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho tem vindo a ser desenvolvida nos últimos anos e está descrita em Santos e Rodrigues (2015). Nos pontos seguintes é apresentada uma descrição resumida da mesma.

3.1. Levantamentos Hidrográficos

Os dados registados pelos sondadores multifeixe são utilizados para obter a superfície batimétrica da área. Estes dados foram processados através do algoritmo CUBE – *Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator*, desenvolvido por Calder (2003) que se encontra implementado na aplicação CARIS HIPS & SIPS. A superfície que resulta desta aplicação é utilizada no processamento do sinal de retrodispersão, para permitir a determinação do ângulo de incidência dos feixes no fundo marinho.

3.2. Processamento do sinal de retrodispersão

O sinal de retrodispersão adquirido nos LH é processado com a ferramenta *Fledermaus Geocoder Toolbox* (FMGT), a qual aplica diversas correções radiométricas e geométricas (ganhos, intensidade da fonte, a forma de feixe do sondador; a correção das perdas ao longo do trajeto do sinal e respetiva área sonorizada). A normalização do sinal de retrodispersão é obtida através dos processos de georreferenciação, *despeckle* e a aplicação do AVG – *Angular Varying Gain* (Lurton e Lamarche, 2015). A imagem criada após a aplicação destas correções, reflete as características acústicas da superfície insonificada. A técnica ARA, implementada na ferramenta FMGT, permite a caraterização remota do fundo marinho através da inversão do modelo de resposta acústica desenvolvido pelo *Applied Physics Lab – Univer. of Washington* (Jackson, 1994). O diâmetro médio do grão, estimado por esta técnica, está limitada aos valores compreendidos entre -1 ϕ a 9 ϕ, sendo que $\phi=-\log_2(d)$, escala definida por Krumbein (1938), sendo d o diâmetro do grão em mm.

3.3. Análise granulométrica

As amostras de sedimentos e respetiva análise granulométrica desempenham duas funções distintas: a) são utilizadas na correção à forma do feixe, de modo a calibrar a resposta acústica com o tipo de fundo; b) na avaliação do rigor da caraterização remota realizada com a aplicação do modelo acústico.

A análise granulométrica de cada amostra de sedimentos foi realizada com a combinação do método da difração laser (fração cujas partículas têm dimensões inferiores a 500 µm) e do método clássico da peneiração (fração da amostra cujas partículas têm dimensões superiores a 500 µm). No final de cada ensaio, para além da curva granulométrica, foram calculados os respetivos parâmetros estatísticos mais representativos através do método dos Momentos (Folk, 1966).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Retrodispersão normalizada

A retrodispersão normalizada, para valores compreendidos entre -70 e 10 dB, permite a avaliação da forma como o sinal acústico é disperso pelo fundo (função da rugosidade da superfície e características físicas do material que o cobre) sendo a intensidade da resposta acústica do fundo representada em tons de cinzento, correspondendo os tons claros aos valores mais elevados (Fig. 2). Os valores mais elevados de retrodispersão correspondem a sedimentos mais grosseiros, enquanto os sedimentos mais finos, apresentam uma resposta acústica mais fraca (tons mais escuros na Fig. 2). A distribuição da retrodispersão permite concluir que os sedimentos finos se localizam junto às margens do rio (junto a Almada e na margem norte a montante da Cruz Quebrada), apesar de se encontrarem exceções na zona central do canal, indício da grande variação da dinâmica sedimentar ao longo do canal de navegação. São particularmente evidentes as zonas de sedimentação mais fina na zona junto à Trafaria (Fig. 2) e a área que contorna o Bugio.

4.2 Estimativa do tamanho médio do grão

A estimativa ARA do tamanho médio do grão permite-nos individualizar diferentes manchas de sedimentos (Fig. 3). Os sedimentos mais grosseiros encontram-se, predominantemente, no centro do canal do rio, representado pelos tons azulados. O diâmetro médio destes sedimentos está compreendido entre -1 ϕ e 1 ϕ e diminuem na direção das margens onde atingem valores de 4 ϕ (áreas mais escuras da figura 2). Individualizam-se três zonas: 1- início do canal (Zona 1) com sedimentos mais grosseiros, atingindo o limite do modelo acústico (-1.0 ϕ) e onde existem três amostras que não recuperaram sedimentos (classificadas como rocha aflorante, círculos de cor preta na figura 3); 2- No trecho central (Zona 2) os sedimentos mais grosseiros estão localizados numa faixa central estreita e alongada, estando limitados em direcção às margens por areias de diâmetro entre -0.5 ϕ e 4.0 ϕ; 3- Zona da desembocadura (Zona 3), localizada a jusante de Paço de Arcos, onde as areias têm diâmetro médio entre 2.0 ϕ e 4.0 ϕ (Fig. 3).

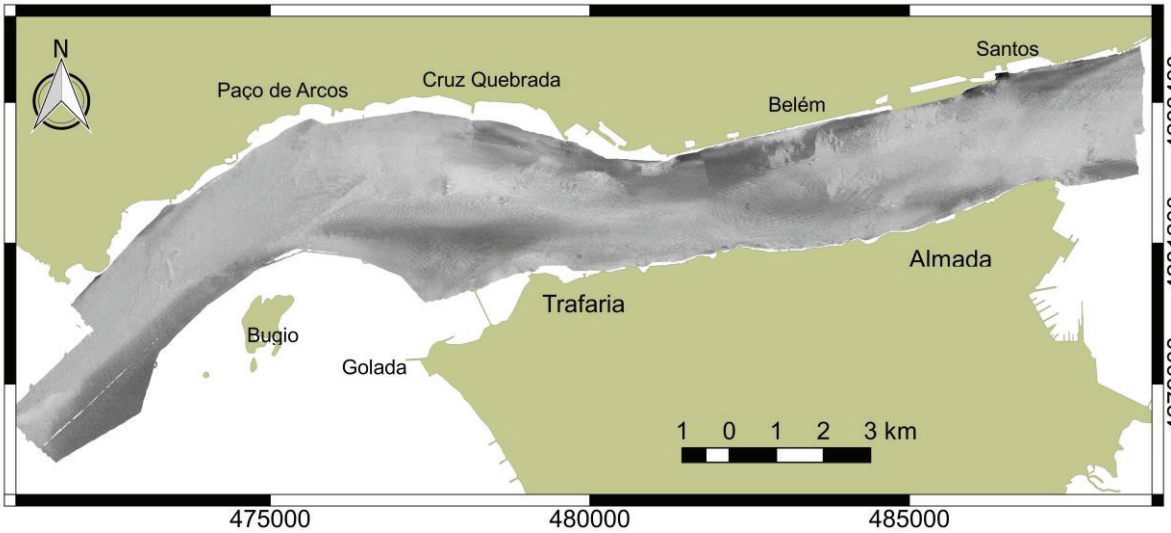


Fig. 2. Imagem do mosaico com o sinal acústico de retrodispersão normalizado para os 4 LH, equalizada para os valores -45 e -5 dB.

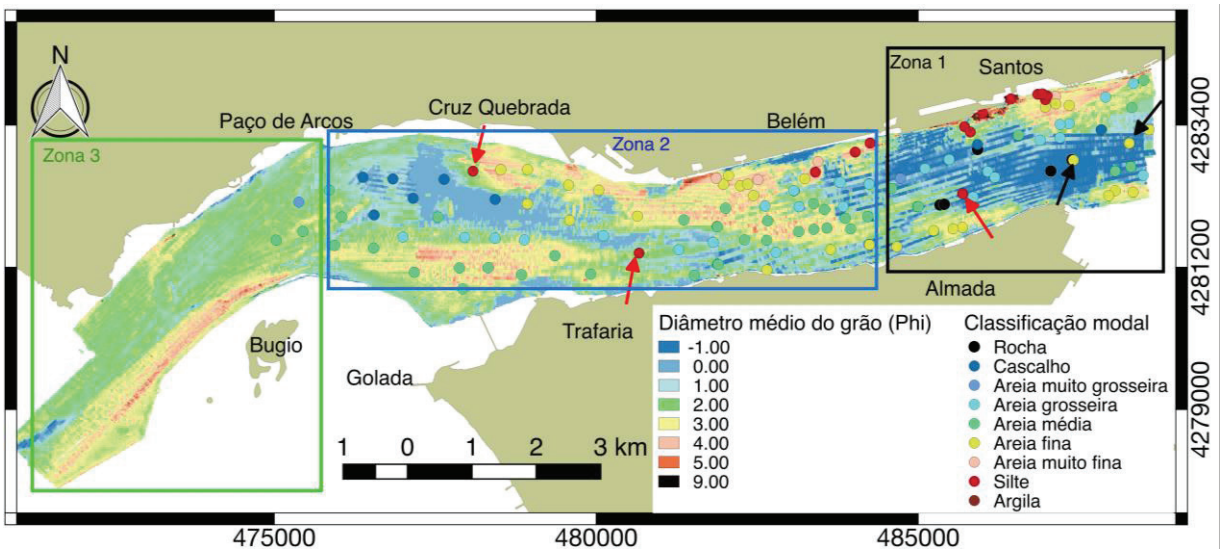


Fig. 3. Cartografia do leito da embocadura do rio Tejo, representando o tamanho médio do grão da cobertura sedimentar obtido pela técnica ARA. Localização das amostras de sedimentos e respectiva dimensão granulométrica obtida por análises laboratoriais. Localização das zonas 1, 2 e 3 descritas no texto. As setas encarnadas e pretas indicam diferenças entre a classificação das amostras obtida pela técnica ARA e pela determinação laboratorial.

Das 155 amostras, apenas 6 (3.8%) apresentam classificações determinadas por análises laboratoriais que diferem por completo do resultado obtido da técnica ARA. No entanto, após análise visual do sinal de retrodispersão e respectiva superfície batimétrica verifica-se que 3 dessas amostras (setas de cor preta da figura 3) estão localizadas numa zona com uma distribuição espacial muito irregular, em que existem pequenas áreas de sedimentos num fundo maioritariamente rochoso. É possível que a técnica ARA não consiga resolver áreas muito pequenas, nomeadamente se estas tiverem um grande contraste com o tipo de fundo que as envolve. Existem outras discrepâncias que provavelmente resultam de meros desvios espaciais, pois na vizinhança dessas amostras existe o mesmo tipo de sedimento, segundo a técnica ARA. Estes desvios podem ser causados por alterações do tipo de fundo devido ao alto hidrodinamismo (uma vez que os LH foram realizados em alturas diferentes da amostragem) e com pequenos erros no posicionamento do colhedor.

4.3. Dinâmica das partículas

A grande variabilidade do diâmetro médio do grão, é inerente ao próprio sistema estuarino, pois existe um fluxo permanente de saída da água (e de sedimentos em suspensão) do rio em direção ao Oceano e um fluxo contrário provocado pelo efeito da preia-mar (Neves, 2010; Abreu, 2010). Este encontro de correntes provoca uma desaceleração localizada das correntes, que é particularmente evidente nas zonas marginais e menos profundas, nomeadamente junto à Trafaria e envolvendo o Bugio (Barra Sul). Na margem norte existe também uma zona de deposição sedimentar, em especial a montante da Cruz

Quebrada. Aparentemente, os meandros do traçado do rio projetam o fluxo do rio na direção da margem sul do canal, provocando o aumento da corrente próximo da margem sul e respetiva erosão e aumento da profundidade (Oliveira, 1967; Neves, 2010).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estimativa do diâmetro do grão no canal do rio Tejo apresentado neste trabalho é compatível com o conhecimento pré-existente do fundo sedimentar nesta zona (Oliveira, 1967; Moita, 1985; Portela e Neves, 1994), apesar de baseado em poucas amostras.

Os resultados apresentados neste trabalho permitem uma visão sem precedentes da distribuição granulométrica dos sedimentos no canal de embocadura do rio Tejo. Esta cartografia permite identificar uma elevada variação espacial da granulometria, consistente com a complexidade dos processos de dinâmica sedimentar junto ao fundo induzidos pela maré semidiurna (Neves, 2010; Portela e Neves, 1994), pelo caudal sólido do rio e pela própria configuração da margem.

De acordo com a cartografia realizada, as zonas onde o hidrodinamismo é superior estão concentradas no eixo do canal, local onde apenas existem as partículas mais grosseiras, indício de erosão no fundo. As margens (junto a Santos, Almada, entre Belém e Cruz Quebrada, Trafaria e no Bugio a montante da Cruz Quebrada), são os locais que têm sedimentos mais finos, indicativo de desaceleração da corrente de fundo e consequente sedimentação.

As diferenças encontradas na determinação do diâmetro médio do grão entre a técnica ARA e o método laboratorial foram mínimas (4% das amostras). Estes resultados atestam a robustez desta ferramenta, e algumas hipóteses foram apresentadas para justificar estas diferenças. Serão necessários estudos complementares para confirmar estas hipóteses .

Esta ferramenta é extremamente vantajosa, especialmente em ambientes sedimentares complexos e é possível de obter em qualquer levantamento hidrográfico com sondador multifeixe calibrado.

Agradecimentos

Os autores pretendem agradecer a todos os participantes dos cruzeiros de aquisição de dados e a todos aqueles que os processaram. Tal como aos contributos dos revisores.

REFERÊNCIAS

Abreu, F. (2010). O Porto de Lisboa e a Golada do Tejo. *Revista de Marinha*.

Calder, B. (2003). Automatic statistical processing of multibeam echosounder data. *The International hydrographic review*, 4(1)

Folk, R.L., 1966. A review of grain-size parameters. *Sedimentology*, 6, 77-93.

Fonseca, L., e Mayer, L. (2007). Remote estimation of surficial seafloor properties through the application Angular Range Analysis to multibeam sonar data. *Marine Geophysical Researche*s, 28(2), 119-126.

Jackson, D. R. (1994). APL-UW high-frequency ocean environmental acoustic models handbook. Applied Physics Laboratory, University of Washington, Technical Report, 9407.

Krumbein, W. C. (1938) Size frequency distribution of sediments and the normal phi curve. *Journal of Sedimentary Petrology*, 7, 3-17.

Lurton, X., e Lamarche, G. (2015). Backscatter measurements by seafloor mapping sonars. Marine Geological and Biological Habitat Mapping. *A collective report by members of the GeoHab Backscatter Working Group*, (May), p. 200.

Moita, I. (1985) – *Das Cartas Litológicas Submarinas ao Programa SEPLAT*. Anais do Instituto Hidrográfico, 6: 43-45.

Neves, F.J., (2010). *Dynamics and Hydrology of the Tagus Estuary: Results from in Situ Observations*. PhD thesis. Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal, p. 210.

Portela, L.I., Neves, R., 1994. Numerical modelling of suspended sediment transport in tidal estuaries: a comparison between the Tagus (Portugal) and the Scheldt (Belgium-The Netherlands). *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*. 28, 329 e 335.

Santos, R. e Rodrigues, A. (2015). Caracterização remota dos sedimentos marinhos para fins de cartografia sedimentológica através do algoritmo Angular Range Analysis. *VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*.

A estrutura e a evolução recente do Mar da Ericeira

A. Rodrigues (1), F. Ferreira (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa; aurora.bizarro@hidrografico.pt.

Resumo: O depósito lodoso da Ericeira (DLE), reconhecido na carta dos depósitos sedimentares superficiais (Folha SED4), cobre uma área superior a 25 milhas quadradas da plataforma continental ao largo da Ericeira, entre os 60 m e os 120 m de profundidade conhecida como Mar da Ericeira. Morfologicamente enquadrado por importantes relevos submarinos, este depósito apresenta caraterísticas texturais muito diferentes da natureza grosseira que carateriza a cobertura sedimentar deste setor da margem portuguesa, pelo que a sua origem e evolução sempre foi motivo de discussão científica. Tendo por objetivo contribuir para o conhecimento da evolução deste setor da margem portuguesa, e do DLE em particular, foram analisados alguns perfis de reflexão sísmica ligeira, cuja interpretação é apresentada neste trabalho. Os registos comprovam o forte controlo estrutural da bacia sedimentar e mostram a pouca espessura deste depósito, que assenta discordantemente sobre as camadas detríticas do meso-cenozóico.

Palavras-chave: *Boomer*, sismoestratigrafia, Ericeira, evolução pós-glaciária.

1. INTRODUÇÃO

O Esporão da Estremadura (EE), importante unidade fisiográfica da margem oeste-ibérica, estende-se desde o Canhão da Nazaré até ao Canhão Submarino de Lisboa. Morfologicamente, o EE apresenta singularidades únicas, conhecidas desde a década de 70 do século passado (Boillot, Mougenot *e colaboradores*, 1975; Mougenot, 1976, Vanney & Mougenot, 1981; Mauffret *et al*., 1989) relacionadas com a grande extensão e irregularidade morfológica (Figura 1).

De fato, a análise da figura 1 mostra a extensão anormalmente elevada do EE (superior a 60 km) com o bordo da plataforma localizado abaixo dos 300m de profundidade, para além da morfologia muito acidentada, com vastas áreas de afloramentos rochosos, mais ou menos alinhados em direções específicas (ESE-WNW e NNE-SSW). A camada sedimentar pouco expressiva é, genericamente muito grosseira (Figura 1) e indiciando um fornecimento continental pouco significativo e sujeito a uma forte dinâmica junto ao fundo (Balsinha, 2008; Balsinha *et al.*, 2014).

No entanto, em plena plataforma interna/média, ao largo da Ericeira, sobressai uma área aplanada, denominada como "Mar da Ericeira" (Vanney & Mougenot, 1981), onde os sedimentos superficiais apresentam caraterísticas contrastantes relativamente aos depósitos que os rodeiam (IH, 2010). Composto por depósitos sedimentares com mais de 50% de partículas finas de origem litoclástica (IH, 2010), o Depósito Lodoso da Ericeira (DLE), ainda não tem origem totalmente explicada no quadro dos processos de dinâmica recente (Balsinha *et al.*, 2014). O fato da plataforma do EE estar isolada dos processos sedimentares que afetam as plataformas médias e externas dos sectores a norte e a sul, pela presença de barreiras intransponíveis às correntes de fundo (canhões) que circulam paralelamente à linha de costa, faz com que o EE constitua um sector-chave na compreensão da evolução recente da margem portuguesa.

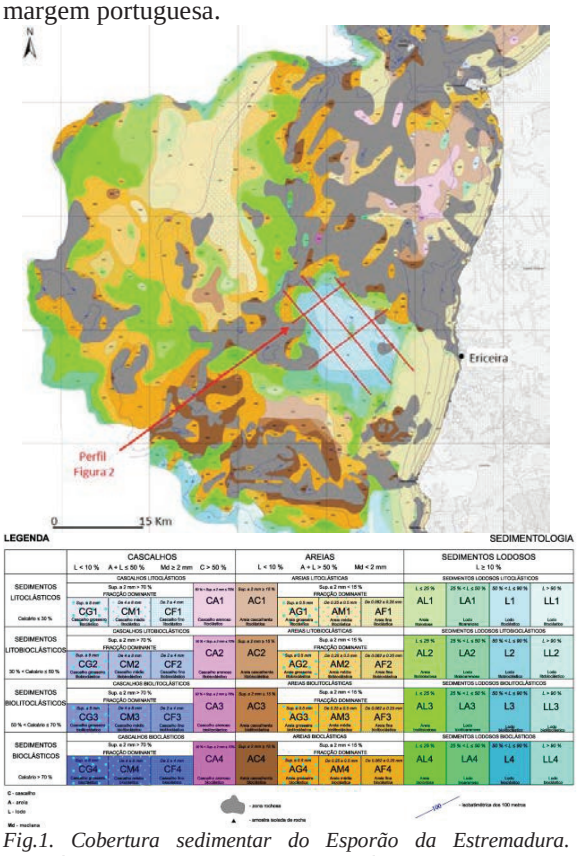


Fig.1. Cobertura sedimentar do Esporão da Estremadura. Batimétricas com espaçamento de 10 m até aos 50 m e dos 100 m, 200 m e 500 m. Localização dos perfis sísmicos assinalada com linhas vermelhas (adaptado de IH,2010).

1.1. Objetivos

Os objetivos deste trabalho consistem na descrição das principais unidades sismo-estratigráficas dos

níveis superiores da plataforma continental e na identificação de eventual condicionalismo estrutural para a origem do Mar da Ericeira. Tendo em consideração a evolução meso-cenozóica da margem ocidental portuguesa, sintetizada por Badagola (2008) e Dias *et al*. (2000), será proposto um modelo de evolução deste sector.

1.2. Localização e origem dos dados

Em Maio de 2015, foram adquiridos pelo Instituto Hidrográfico cincos perfis de reflexão sísmica (Figura 1). Os perfis distribuem-se em duas direções perpendiculares entre si, cobrindo o DLE entre os 60 m e os 120 m. O levantamento foi realizado, com um sistema de reflexão sísmica monocanal *Boomer* da Aplied Acoustics (fonte sísmica CAT200 e fonte de energia CSP300), operado com uma energia de 100 Joules e um intervalo entre disparos de 500 ms. A aquisição do sinal foi assegurada com um hidrofone (oito elementos, espaçados de 50 cm e um pré-amplificador incorporado) e amostrado por uma carta ADC (Analogic Digital Converter) a 16 bits. A gravação do sinal foi realizada no *software* Trinton Seismic 2.7 (Trinton Elics International) em ficheiros *.tra. A velocidade média de reboque do sistema foi de 4 nós. O posicionamento foi garantido através de um sistema DGPS (Trimble).

O processamento, visualização e interpretação dos perfis, foi efetuado recorrendo ao *software* Delph Seismic Interpretarion. O processamento das linhas sísmicas inclui a correção de dados de navegação e a aplicação de filtros passa-banda e de ganhos de controlo variável no tempo (TVG), o somatório de traços (trace sum), bem como a correção do efeito da ondulação.

2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

Fazendo parte da Bacia Lusitaniana, o EE deve as suas caraterísticas morfológicas à evolução que a margem oeste-ibérica sofreu desde o Jurássico inferior, altura em que se instalou as várias fases de estiramento crustal associadas ao *rifting* atlântico. De acordo com Boillot, Mougenot e colaboradores, (1975), Mougenot (1974), Vanney & Mougenot (1981), a Bacia Lusitaniana teve o seu principal episódio de formação na transição Jurássico médio/ Jurássico superior (Caloviano-Oxfordiano), com o jogo de grandes estruturas crustais de direção NNE-SSW e a criação de fossas crustais. Após este estiramento inicial, várias fases de enchimento se sucederam, alternando com episódios de levantamento crustal e dobramentos. As zonas deprimidas foram preenchidas por importantes camadas detríticas (grés, argilas e conglomerados) no fim do Jurássico (Kimmeridgiano/ Portlandiano), e por uma espessa série detrítica terrígena e carbonatada (de ambiente fluvial ou marinho) durante o Cretácico inferior e Cenomaniano, esta última idade testemunhando um ambiente fortemente transgressivo. Coincidindo com a rotação sinistrógira da Península Ibérica e com a instalação do corpo intrusivo de Sintra, toda a plataforma adjacente à Estremadura sofreu um grande período regressivo que marcou a passagem do Mesozoico para o Terciário (Ribeiro *et al.*, 1979). As condições de exposição subaérea mantiveram-se instaladas durante o Paleocénico e início do Eocénico, correspondendo a um grande hiato sedimentar. Com a fase pirenaica da orogenia alpina a ocorrer do Eocénico médio ao Oligocénico (Luteciano superior/Chatiano superior), muitas falhas da margem oeste ibérica foram reativadas, em especial as de direção NE-SW, havendo rejuvenescimento de blocos crustais das fossas de direção NW-SE (Mougenot, 1976; Badagola, 2008) que, durante os grandes ciclos transgressivos do Neogénico e Quaternário foram totalmente preenchidas. De acordo com Mougenot (1989) o Mar da Ericeira corresponde a uma destas depressões, parcialmente preenchida por três sequências transgressivas neogénicas que se estendem desde o início do Miocénico até ao Pliocénico. Durante o Quaternário, não obstante o novo quadro geodinâmico associado à rotação do campo de tensões quaternário (Cabral & Ribeiro, 1989), os processos sedimentares do EE passaram a ser dominados pela sucessão de transgressões e regressões induzidas pelas alterações climáticas.

Durante o Quaternário superior, e de acordo com Dias *et al*. (2000), a variação das condições climáticas foi determinante nos processos de dinâmica sedimentar marinha que estão na origem dos atuais depósitos sedimentares reconhecidos na Figura 1. Há 18 000 anos, em pleno máximo glaciário, quando o nível médio do mar se encontrava 140 m abaixo da cota atual, a plataforma continental estava exposta aos agentes de erosão subaérea e a quase totalidade das partículas não consolidadas era transportada, por linhas de água de grande caudal, para a plataforma externa e zonas das cabeceiras dos vales submarinos. No EE, não é de ignorar a grande variabilidade de relevos que, nos períodos de descida do nível médio do mar, contribuiriam localmente com grande volume de sedimentos para as linhas de água que serpenteavam pela plataforma. Há medida que as condições climatéricas melhoraram, e o período de degelo se instalou, a plataforma e a rede fluvial que a percorria foram sendo progressivamente inundadas até o nível médio do mar atingir a cota dos -40m (há 11 000 anos atrás). Nessa altura, novo evento regressivo se instalou (devido a degradação climatérica) e o nível do mar desceu cerca de 20 metros em 1 000 anos. Esse período, conhecido como Dryas Recente, marcou, há 10 000 anos, o início da época holocénica, durante a qual o nível médio do mar subiu desde os -60m até atingir a cota atual, há cerca de 5 000 anos atrás.

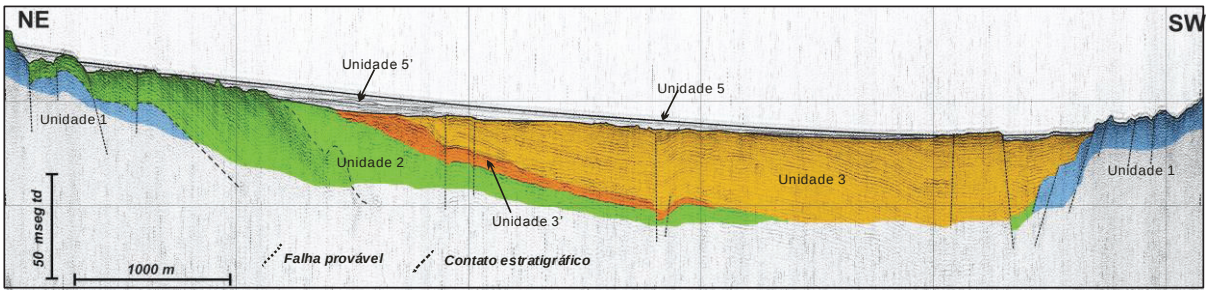


Fig. 2. Perfil ilustrando a estrutura geral do Mar da Ericeira e do Depósito Lodoso da Ericeira (Unidade 5). Localização na Figura 1.

3. RESULTADOS

3.1 Estratigrafia Sísmica

A aplicação dos critérios de interpretação sísmica aos perfis de reflexão sísmica permitiu individualizar 5 unidades sísmicas com diferentes fácies e posições estratigráficas (Figura 2).

A unidade mais antiga (**Unidade 1**) constitui o soco acústico (muito refletivo e sem nenhuma reflexão interna). A unidade sísmica seguinte (**Unidade 2)** é limitada na base por um refletor, nem sempre contínuo. Do ponto de vista acústico, esta unidade é bastante variável podendo os refletores internos apresentar diferentes amplitudes e evidências de deformação frágil, principalmente nos locais mais afetados por falhas. Estas duas unidades mais antigas afloram, essencialmente, na zona norte e leste da área.

A **Unidade 3** é aquela que apresenta maior desenvolvimento na zona do Mar da Ericeira, com penetração do sinal até um máximo de 63 ms (t.d.). Depositada sobre uma superfície erosiva, a sua fácies carateriza-se por refletores subparalelos com continuidade e amplitude variáveis. Nos perfis NE-SW, os refletores aparentam algumas flexuras de grande raio de curvatura e a mudança vertical de amplitude parece indicar alternância de níveis com diferentes impedâncias acústicas. Os frequentes relevos em costeira, que se observam nos locais onde esta unidade aflora (zona central do Mar da Ericeira) são compatíveis com formações detríticas carbonatadas de diferente resistência à erosão marinha (Badagola, 2008). Esta unidade também está afetada por falhas (sub-verticais), sendo observadas ainda algumas dobras e flexuras. Localmente, na base da unidade 3, foi possível definir uma sub-unidade 3' que terá resultado de um episódio de reativação muito localizado. Nos perfis perpendiculares (NE-SW), a unidade 3 está inclinada para SW, sendo limitada superiormente por uma superfície de erosão e coberta pela **Unidade 4** que também aparenta tratar-se de uma sequência de enchimento. Os refletores da unidade 4, com boa continuidade e amplitude variável, terminam em *on-lap* sobre o topo da unidade inferior. De uma forma geral, as falhas que se observam na unidade 3 propagam-se por esta unidade e, apesar de a cortarem integralmente, não se propagam para as unidades mais recentes.

A **Unidade 5** é a mais recente, limitada na base por um refletor que corresponde a uma superfície de erosão importante que corta as unidades 1 a 4. Tem uma espessura máxima da ordem dos 6.45 ms (t.d.) junto ao afloramento das unidades mais antigas, na zona norte. Tem uma fácies sísmica que varia entre a sub-transparência, a presença de refletores paralelos de baixa amplitude e grande continuidade, indicando um ambiente sedimentar de plataforma calmo sem grande variação lateral. No entanto, apesar da grande extensão espacial da unidade 5, identifica-se ainda uma sub-unidade basal (sub-unidade 5'), visível apenas na proximidade das unidades 1 e 2, com refletores de maior amplitude e menor continuidade (refletindo provável ambiente de maior energia e a presença de materiais mais grosseiros).

4. DISCUSSÃO E RESULTADOS

As formações mais antigas (Unidade 1) que são encontradas no sector estudado poderão corresponder a calcários micríticos, depositados em ambiente de mar aberto (Mougenot, 1976), num período anterior à criação da Bacia Lusitaniana identificados por Boillot *et al*. (1974). Após o levantamento e estiramento crustal (onde grandes falhas são responsáveis pela formação de estruturas em *horsts* e *grabens*), o relaxamento crustal permitiu os primeiros episódios de deposição, com o preenchimento das zonas mais deprimidas da recém-formada Bacia Lusitaniana. Na zona em estudo, estas primeiras formações detríticas, corresponderão à Unidade 2 tendo Boillot *et al*. (1974) datado amostras gresosas e conglomeráticas colhidas no EE do Kimmeridgiano/ Portlandiano. De acordo com a síntese de Badagola (2008), durante o Cretácico, a alternância dos regimes extensionais e de abatimento crustal com períodos transgressivos, promoveu a continuação da edificação de camadas sedimentares que, na zona da Ericeira e Sintra, apresentavam uma fácies carbonatada de influência nerítica (Mougenot, 1976), tendo culminado com as formações transgressivas do Cenomaniano, idade em que o mar cobriu grande área da plataforma da Estremadura.

Esta tendência foi interrompida pelas fases de deformação alpinas, a partir do Cretácico superior, quando grande parte das estruturas existentes (em

especial as falhas NE-SW) foram reativadas e promoveram a movimentação vertical dos blocos crustais. As unidades 3 e 4, testemunhando o empilhamento de espessas camadas detríticas mais ou menos carbonatadas, refletem a sucessão de eventos transgressivos, separadas pelos impulsos alpinos. Assim, a Unidade 3, depositada sobre uma superfície de erosão, e corresponde à deposição das camadas do Paleogénico superior (Éocénico e Oligocénico), interrompida por nova fase de compressão alpina (na passagem do Oligocénico para o Miocénico), que promoveu a movimentação de blocos profundos e reativação das falhas pré-existentes. De acordo com Mougenot (1976; 1989) e Badagola (2008), o Mar da Ericeira, como unidade geomorfológica, nasce nesta fase. As caraterísticas da Unidade 4 são compatíveis com a sucessão de diversos ciclos transgressivos neogénicos, havendo evidências de alguma variabilidade interna nos processos de sedimentação, bem como de deformação provocada pela reactivação de falhas existentes a maior profundidade.

Posteriormente ao Pliocénico o EE esteve exposto às grandes oscilações glacio-eustáticas quaternárias e dá-se a última fase de preenchimento de bacia como comprova a superfície de aplanação que trunca discordantemente todas as formações atrás referidas e que constitui a base da unidade mais recente (Unidade 5). Não havendo uma datação absoluta desta formação, propõe-se que a sua idade seja posterior ao Último Máximo Glaciar (Ruddiman & McIntyre, 1981), quando o nível do mar se encontrava aos -140m de profundidade (Dias, *et al*., 2000) e todo o setor do Mar da Ericeira se encontrava exposto aos agentes de erosão subaéreo.

No período pós-glaciário seguinte, à medida que o nível do mar subiu em cota, depositou-se a Unidade 5, colmatando pequenos vales identificados nos afloramentos rochosos, por onde correriam as linhas de drenagem que sulcavam a plataforma continental. Esta tendência transgressiva foi interrompida pela crise climática do Dryas Recente, altura em que nível do mar passou da cota -40m para a cota -60m (Dias, *et al*., 2000). Como consequência da descida brusca do nível de base, grande parte dos depósitos formados no ciclo anterior foram dispersos. No entanto, dada a provável grande heterometria dos mesmos e a proximidade a importantes relevos, os depósitos junto à base dos relevos não foram totalmente obliterados e correspondem à sub-Unidade 5'. A formação mais recente, devido à sua juventude e ao reduzido contributo terrígeno não cobre ainda a totalidade dos afloramentos presentes no Mar da Ericeira.

O modelo evolutivo apresentado carece de estudos complementares, nomeadamente envolvendo a aquisição de novos perfis de reflexão sísmica, para pormenorizar e cartografar as estruturas identificadas nos perfis já analisados, e novas amostras geológicas que permitam corroborar a evolução ambiental deste sector da margem.

REFERÊNCIAS

Badagola, A. (2008). *Evolução morfo-tectónica da plataforma continental do Esporão da Estremadura*. Tese de Mestrado, U.Lisboa, 171 pp (*não publicado*).

Balsinha, M. (2008). "*A cobertura sedimentar da plataforma continental portuguesa, entre o Canhão submarino da Nazaré e a Ericeira*". Tese de Mestrado, Univ. Lisboa (*não publicado*).

Balsinha, M.; Fernandes, C.; Oliveira, A.; Rodrigues, A.; Taborda, R. (2014). Sediment transport patterns on the Estremadura Spur continental shelf: insights from grain-size trend analysis. *Journal of sea Research*, 93:28-32.

Boillot, G.; Mougenot, D. *e outros* (1975). *Nota explicativa da Carta Geológica da plataforma continental de Portugal*. Esc. 1/1 000 000. SGP.

Cabral, J.; Ribeiro, A. (1989). *Nota explicativa da Carta Neotectónica de Portugal Continental*. Esc. 1:1000000. Serviços Geológicos de Portugal.

Dias, J.M.A.; Boski, T.; Rodrigues, A.; Magalhães, F. (2000). Coast line evolution in Portugal since the Last Glacial Maximum until present: a synthesis. *Marine Geology*, 170:177-186.

IH (2010). *Sedimentos superficiais da plataforma continental. Folha SED4 (Cabo Carvoeiro ao Cabo da Roca)*, esc. 1:150000, 1ª Edição.

Mauffret, A.; Mougenot, D.; Miles, P.R.; Malod, J.A. (1989). Cenozoic deformation and mesozoic abandoned spreading centre in the Tagus Abyssal Plain (west of Portugal): results of a multichannel seismic survey. *Can. J. Earth Sci.*, 26, 1101-1123.

Mougenot, D. (1976). Geologie du plateau continental portugais (entre le cap Carvoeiros et le cap de Sines. Fascicule 1 et 2. Thèse 3ème cycle. Univ. Rennes, 76 pp (*não publicado*).

Mougenot, D. (1989). *Geologia da margem Portuguesa*. Doc. Técnicos do IH, 32, 259 pp.

Ribeiro, A., Antunes, M.T., Ferreira, M.P., Rocha, R., Soares, A.F., Zbyszewski, G., Moitinho de Almeida, F., Carvalho, D. & Monteiro, J.H. (1979). *Introduction à la géologie générale du Portugal*. Serv. Geológicos Portugal, 3-114.

Rodrigues, A. (2004). *Tectono-Estratigrafia da Plataforma Continental Setentrional Portuguesa*. Doc. Técnicos do IH, 33. 244 pp.

Ruddiman, W.F.; McIntyre, A., (1981). The north Atlantic ocean during the last deglaciation. *Palaeogeog.Palaeocli.Palaeoeco*. 35:145-214.

Vanney, J.; Mougenot, D. (1981). La plate-forme continentale du Portugal et les provinces adjacentes: analyse géomorphologique. *Mem. Serv.Geol.Portugal*, 28, 145 pp.

Principais estruturas geológicas observadas na plataforma continental ao largo de Sesimbra

A. Vinhas (1) e A. Rodrigues (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa; andre.costa@hidrografico.pt.

Resumo: A cadeia da Arrábida é o relevo mais proeminente existente a sul de Lisboa constituindo uma das principais evidências dos efeitos da orogenia Alpina na Margem Oeste Ibérica. No entanto, o prolongamento das estruturas geológicas emersas da cadeia da Arrábida para a plataforma continental nunca foi observado devido à inexistência, até recentemente, de dados geofísicos nesta zona da plataforma. Nesse sentido, através da descrição de perfis de reflexão sísmica monocanal, adquiridos pelo Instituto Hidrográfico, é proposta uma primeira descrição das unidades sismo-estratigráficas e da estrutura da plataforma continental ao largo de Sesimbra.

Palavras-chave: Perfis sísmicos, estruturas geológicas, plataforma continental, Sesimbra, Cadeia da Arrábida, Orogenia Alpina.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste no reconhecimento do estilo de deformação que afeta as principais unidades sismo-estratigráficas superficiais presentes na plataforma continental a sul de Sesimbra e a sua correlação com a estrutura geológica descrita na área emersa

1.2. Enquadramento morfológico

A plataforma continental ao largo de Sesimbra tem em média 15 km de extensão, encontrando-se limitada a oeste pelo entalhe do Canhão de Lisboa e a sul pelo Canhão de Setúbal, os quais convergem para um único sistema a maiores profundidades. Morfologicamente, é caraterizada por três setores diferentes (1) uma rampa convexa, com cerca de 3 km de largura, que se prolonga desde a zona costeira até aos 100 m de profundidade; (2) uma superfície intermédia de menor declive e extensão de 5 km, entre os 100 aos 150 m de profundidade; (3) e um sector externo mais inclinado, abaixo dos 150 m de profundidade (Figura 1).

1.3. Enquadramento geológico

A cadeia da Arrábida, no território emerso adjacente, constitui o relevo mais importante a sul de Lisboa, estendendo-se segundo a direção ENE-WSW, por cerca de 30 km. Esta cadeia representa a estrutura mais importante da tectónica de inversão de idade Miocénica presente na Bacia Lusitaniana estando limitada a Norte pelo sinclinal de Albufeira, a Este pela falha de Pinhal Novo–Setúbal (FPNS) e a Sul pelo alto estrutural de soco (imerso) da Arrábida (Kullberg *et al.*, 2000). Os trabalhos realizados por Boillot *et al.*, (1978) mostram que a estrutura se prolonga para Oeste, por cerca de 5 km ao longo da plataforma continental, terminando, muito provavelmente, contra uma falha de transferência direita, conjugada da FPNS (esquerda) (Figura 1).

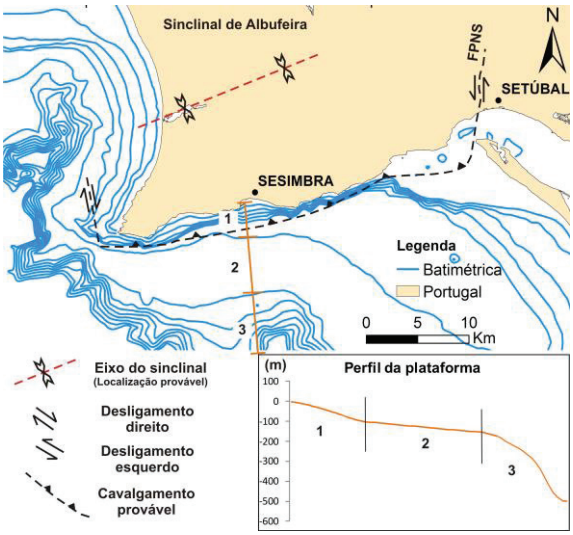


Fig.1. Carta batimétrica da plataforma continental ao largo de Sesimbra, com referência às principais estruturas geológicas e um perfil batimétrico de orientação N-S da plataforma continental, com identificação dos 3 sectores morfológicos.

A cadeia da Arrábida tem idade Meso-Cenozóica (Figura 2) e é essencialmente constituída por sequências sedimentares carbonatadas ($J^{1,2\ e\ 3}$ e K^{1-2}), dolomíticas ($J^{1\ e\ 2}$) e margosas ($J^{1,2\ e\ 3}$ e K^{1-2}), com algumas intercalações mais detríticas (K^2 e E).

Do ponto de vista estrutural, é dominada por dobras e cavalgamentos ENE-WSW, vergentes para sul (Choffat, 1908; Ribeiro & Ramalho, 1986; Ribeiro *et al.*, 1990). Os movimentos compressivos são acomodados por rampas laterais esquerdas e pela ascensão de diapiros salinos (exemplo Sesimbra e Cova da Mijona) (Choffat, 1908; Kullberg & Rocha, 1991).

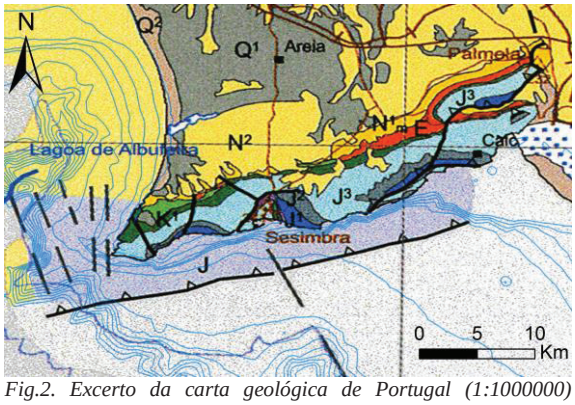


Fig.2. Excerto da carta geológica de Portugal (1:1000000) (LNEG, 2010).

2. DADOS E METODOLOGIA UTILIZADOS

Para a realização deste trabalho preliminar, foram interpretados dois perfis de reflexão sísmica ligeira monocanal (sistema *boomer*), representativos da área de interesse, com direção paralela e perpendicular à linha de costa, adquiridos pelo Instituto Hidrográfico em 2005 e 2007. Os registos sísmicos, foram processados no *software Delph Seismic* da IXBLUE, passando por diversas etapas, nomeadamente correção de *layback*, aplicação de filtros passa-banda (passa-alto e passa-baixo), ganhos do sinal, correção de *swell* e *stacking*. A interpretação sismo-estratigráfica teve como base a metodologia formalizada por Mitchum & Vail (1977), tendo em conta o tipo de terminação e geometria dos conjuntos das reflexões para a definição das unidades sísmicas.

3. RESULTADOS

Apresentam-se de seguida as principais unidades e sub-unidades sísmicas, bem como o estilo de deformação que as afeta.

3.1. Fácies sísmicas – unidades e sub-unidades sísmicas

Nos perfis interpretados foram identificadas, do topo para a base, 5 unidades sísmicas (U1a, U1, U2, U3 e U4), separadas pelas descontinuidades F, S1a, S1, S2 e S3, respectivamente (Figura 3). A primeira descontinuidade (F) é composta por um refletor continuo e de amplitude muito forte. A descontinuidade S1 apresenta boa continuidade lateral e uma amplitude média a fraca. Estes dois reflectores delimitam a unidade sísmica mais superficial (U1), no interior da qual foi identificada a sub-unidade U1a, por apresentar geometria diferente nos reflectores internos. Assim, a fácies das **unidades U1** e **U1a** apresentam refletores paralelos, com boa amplitude e continuidade. Estão separadas pela descontinuidade S1a que limita a subunidade cujos reflectores apresentam configuração progradante sigmoidal (terminações em *toplap* e *downlap*). A unidade U1 apresenta os reflectores sub-horizontais, truncados pela discordância S1a (terminações em *toplap*).

Na **unidade U2**, os refletores também são horizontais e sub-paralelos à discordância S2, que a delimita inferiormente. Pela boa continuidade lateral e amplitude forte e bem marcada, esta discordância foi interpretada como superfície de erosão. Superiormente, a unidade U2 é delimitada pelas superfícies S1 e F (nos locais onde a unidade U1 é inexistente).

A **unidade U3** define-se abaixo do reflector S2 e apresenta uma grande variabilidade espacial no que diz respeito, quer à fácies sísmica, quer ao estilo de deformação. Ao longo dos perfis, esta unidade apresenta reflexões com amplitude variável e boa continuidade, aparentando ser composta pelo empilhamento de bancadas de material detrítico mais ou menos carbonatado. As bancadas são sub-paralelas na direção N-S (Linha 22 da Figura 3) e com diferentes graus de inclinação no perfil paralelo à linha de costa (Linha 35 da Figura 3).

A descontinuidade S3, que corresponde à base da unidade U3, é um reflector muito irregular e aparenta pouca continuidade lateral ao longo dos perfis analisados. Este reflector foi marcado, principalmente, pela deformação observada nas terminações das reflexões desta unidade. A discordância assinala, assim, a passagem de uma unidade muito deformada para a unidade mais antiga e amorfa (sem reflectores internos), a **unidade U4**.

3.2. Principais estruturas geológicas identificadas

A interpretação dos perfis sísmicos, além de caraterizar as unidades sísmicas, permitiu definir o estilo de deformação que afeta as diferentes unidades sísmicas e que se revelou ser bastante complexo e variável ao longo das duas direcções analisadas. No sector E do perfil paralelo à Cadeia da Arrábida, a estrutura mais evidente diz respeito a um antiforma bastante aberto, de plano axial praticamente vertical, cujos flancos se estendem por mais de 3 km para ambos os lados, acabando por se horizontalizar. Para Oeste desta estrutura, observam-se duas linhas de fracturação, separadas aproximadamente por 3,5 km. Na segunda estrutura, observa-se uma mudança drástica no tipo de deformação que passa de frágil a dúctil, coincidindo com a presença da unidade U4 (soco acústico e com evidencias de ascensão vertical, induzindo grande deformação nas unidades suprajacentes). Provavelmente, a unidade sísmica U4 corresponde à formação margo-evaporítica do Jurássico inferior, que segundo Choffat (1905) aproveita zonas de fraturação para, quando sujeitas a tensões compressivas, ascender até níveis superiores na sequência estratigráfica.

No perfil perpendicular à linha de costa (perfil 22, figura 3), a deformação é essencialmente frágil. A estrutura geológica da plataforma interna é dominada por um importante acidente tectónico, do tipo falha vertical com abatimento do bloco sul. Este

acidente pode estar associado à denominada Falha da Arrábida, de direção aproximada ENE-WSW que, segundo Kullberg (2000) e Kullberg *et al.* (2000) tem cinemática de falha normal durante a deformação extensiva do Mesozóico e representa o bordo sul da Bacia Lusitaniana. Durante as fases compressivas do Cenozóico esta falha pode ter sido reativada como falha inversa.

O mesmo estilo de deformação é reconhecido em praticamente todo o perfil, tendo sido reconhecidas falhas verticais que interrompem os refletores sub-horizontais da unidade U3. No centro da plataforma, controlando as laterais de uma estrutura em sinforma, parece haver uma unidade sísmica de fácies semelhante à observada no extremo Oeste do perfil 35, pelo que não é de excluir a presença de camadas margosas ou evaporíticas nesta zona da plataforma. O escape de material, pelas zonas de falha sub-verticais induziu a deformação em sinforma das camadas superiores.

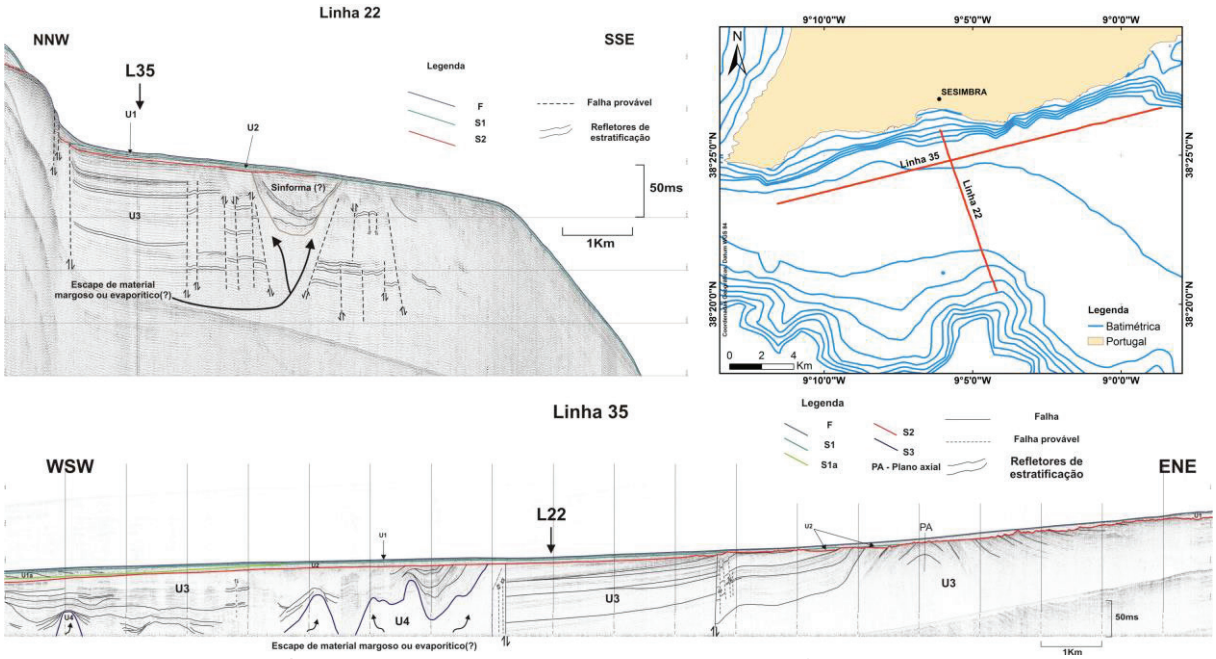


Fig.3. Interpretação das linhas sísmicas 22 e 35.Mapa com a localização das linhas na plataforma continental.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A interpretação de dois perfis dos levantamentos sísmicos existentes permitiu identificar algumas estruturas geológicas frágeis e dúcteis existentes na plataforma continental ao largo de Sesimbra.

A estrutura é dominada por unidades sub-horizontais fortemente afectadas por zonas de fratura bem marcadas (provavelmente associadas à Falha da Arrábida) e por episódios de diapirismo que lubrificaram algumas destas estruturas durante a inversão alpina.

A complexidade geológica e a falta de uma rede mais densa, e uniforme, de perfis de reflexão sísmica não permitiu cartografar o desenvolvimento tridimensional destas estruturas, nem estabelecer a relação destas com as estruturas emersas. Esta linha de investigação deverá continuar para se conseguir compreender melhor a deformação alpina nesta zona da plataforma continental.

REFERÊNCIAS

Boillot, G.; Mougenot, D. (1978). Carta geológica da plataforma continental de Portugal, escala 1/1 000 000. *Serv. Geol. Port. & Inst Hidro. Port.*, Lisboa.

Choffat, P. (1905). Supplément à la description de L'Infralias et du Sinémurien en Portugal. *Comum. Serv. Geol. Portugal*. Lisboa. t. VI, 123-143 pp.

Choffat, P. (1908). Essai sur la tectonique de la chaîne de l'Arrábida. *Mem Comiss. Serv. Geol. Portugal*. Lisboa. 89 p.

Gomes, A. (2000). Evidências geomorfológicas de alguns processos responsáveis pela evolução quaternária do canhão de Setúbal. *Ciências da Terra, UNL*. Lisboa. Nº 14, 213 – 222 pp.

Gomes, A. (2001-2002). Análise morfológica dos canhões submarinos da Nazaré e de Setúbal. *Revista da Faculdade de Letras – Geografia*. I Série, Vol. XVII-XVIII. Porto. 65-135 pp.

(Síntese alargada da Dissertação de Mestrado apresentada na Universidade de Aveiro).

Kullberg, J. C. (2000). Evolução tectónica mesozóica da Bacia Lusitaniana. *Tese, Univ. Nova Lisboa*, 361 p.

Kullberg, J. C.; Rocha, R. B. (1991). Evidências tectónicas da existência de uma estrutura diapírica entre o Cabo Espichel e Sesimbra. *Abst. III Congresso Nac. Geol.* Coimbra, 116 p.

Kullberg, M. C.; Kullberg, J. C.; Terrinha, P. (2000). Tectónica da Cadeia da Arrábida. In Tectónica das regiões de Sintra e Arrábida, *Mem. Geociências, Museu Nac. Hist. Nat. Univ. Lisboa*. Nº 2, 35-84 pp.

Mitchum, R. M. Jr.; Vail, P. R. (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 7: Seismic stratigraphic interpretation procedure. In: Seismic Stratigraphy – App. Hydrocarbon Exp. Payton, C. E. (Ed.). *Am. Ass. Petrol. Geol.*, Mem. 26, 135 – 143.

Mougenot, D. (1989). Geologia da Margem Portuguesa. *Instituto Hidrográfico*. Lisboa. 262p.

Ribeiro, A.; Kullberg, M.C.; Kullberg, J.C.; Manuppella, G.; Phipps, S. (1990). A review of Alpine tectonics in Portugal: Forland detachment in basement and cover rocks. In: G. Boillot and J.M Fontboté (Editors). *Alpine Evolution of Iberia and its Continental Margins. Tectonophysics*. 184: 357-366 pp.

Ribeiro, A.; Ramalho, M. (1986). Estratigrafia e Tectónica da Cadeia da Arrábida. *II Congr. Nac. Geol., Universidade de Lisboa*. Guia da excursão B2/B3.

Vanney, J. R.; Mougenot, D., (1981). La plate forme continentale du Portugal et les provinces adjacentes: Analyse Geomorphologique. *Mem. Serv. Geol. Portugal*. 28, 86 p.

A importância dos modelos sedimentológicos nos projetos *offshore* de energias renováveis

J. Pombo (1), A. Rodrigues (1) e A. P. Silva (2)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa; joaquim.pombo@hidrografico.pt.

(2) Geobiotec e Dept.º Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

Resumo: Uma das grandes limitações à exploração dos recursos energéticos renováveis no mar (vento e ondas) diz respeito à grande variabilidade geológica da plataforma continental, em especial das áreas de implantação de estruturas. Para ilustrar esta variabilidade espacial e chamar a atenção para a necessidade de associar estudos multidisciplinares aos projectos de implementação de estruturas no mar, foi realizado um estudo completo de uma pequena área ao largo de S. Pedro de Muel, o qual deu origem a um modelo sedimentológico da área, exposto neste trabalho.

Palavras-chave: Sedimentos marinhos, modelo sedimentológico, energias renováveis.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem-se verificado um acréscimo na procura de locais para investigação e instalação de estruturas para aproveitamento da energia das ondas e da energia eólica em *offshore*.

Em Portugal, pela sua situação geográfica e geológica, têm surgido diversos projetos para avaliação e exploração destes recursos energéticos (AWS, Pelamis, WaveRoller, Windfloat) e, mais recentemente, o dispositivo Demogravi3. Como incentivo a este tipo de atividade económica o estado português criou a "Zona Piloto" para as Energias das Ondas, com uma área de 320 km^2 ao largo de S. Pedro de Muel.

No entanto, a informação existente sobre as caraterísticas geológicas do tipo de fundo e as caraterísticas físicas das várias camadas sedimentares não são suficientes para projetar a instalação dos vários dispositivos, nem para garantir o seu funcionamento em segurança.

O presente estudo, ao descrever a variabilidade sedimentar de uma pequena área da plataforma continental (Fig. 1), pretende contribuir para a definição de um correto programa de ensaios laboratoriais que permitam caraterizar devidamente o comportamento dos sedimentos marinhos. A zona selecionada para a realização do trabalho, situa-se na plataforma continental portuguesa setentrional ao

largo de S. Pedro de Muel, entre as batimétricas dos 30 e 60 m (Fig. 1).

2. MÉTODOS

Para a prossecução dos objetivos propostos foram realizadas campanhas de prospeção *offshore* para aquisição de dados através de técnicas indiretas, nomeadamente de sondadores acústicos (Multifeixe EM 710) e sistemas de reflexão sísmica ligeira (S*ub-bottom profiler Echoes* 3500 e Boomer), complementadas com amostragem sedimentar superficial (colhedor *Smith-McIntyre*) e vertical (*vibrocorer* elétrico ROSSFELDER P-5C) da camada sedimentar não consolidada (Fig. 1). A amostragem realizada foi encaminhada para o laboratório para realização de ensaios de caraterização física e mecânica dos sedimentos. Foram realizados, em primeiro lugar, os ensaios não destrutivos (suscetibilidade magnética e ondas *P*) e, posteriormente, os ensaios destrutivos (análise granulométrica, teor em carbonatos e teor em água).

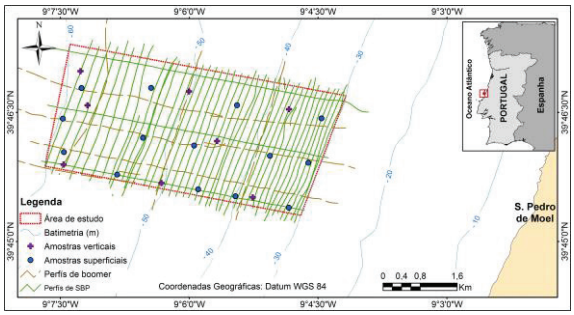


Fig. 1. Localização da área de estudo e dados explorados neste trabalho.

3. RESULTADOS

3.1. Morfologia

De acordo com Pombo *et al.* (2015) a área estudada apresenta uma morfologia suave, com pendor regular e inclinado para W, apresentando-se as batimétricas, na sua globalidade, paralelas à linha de costa e uniformemente espaçadas entre si (Fig. 2).

3.2. Depósitos superficiais

Através do processamento do sinal acústico do levantamento de multifeixe e dos resultados das análises granulométricas das amostras superficiais foi realizada a cartografia sedimentar da área (Fig.3).

Identificam-se dois depósitos sedimentares:

- Depósito cascalho arenoso, entre as batimétricas dos 55 m e 61 m, caraterizado por 78% de partículas cascalhentas mal calibradas, 19% de partículas arenosas e 3% de partículas silto-argilosas;
- Depósito arenoso mal calibrado, entre as batimétricas dos 30 e 55 m, constituído por cerca de 94% de partículas arenosas finas e por percentagens inferiores a 6% de partículas silto-argilosas.

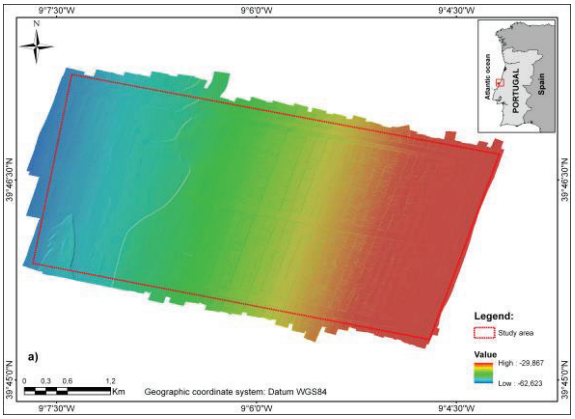


Fig. 2. Modelo digital da superfície do fundo marinho (Pombo et al. 2015).

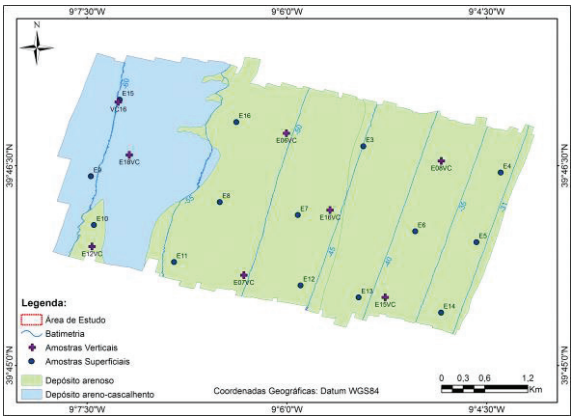


Fig. 3. Depósitos superficiais da área de estudo.

3.3. Variação vertical de fácies sedimentar

A caraterização vertical das unidades sedimentares amostradas nas oito posições é descrita nos pontos seguintes, a partir dos resultados das análises e dos ensaios laboratoriais das amostras verticais representadas nas figuras 4 a 11. Nessas figuras, os níveis verdes correspondem ao depósito arenoso e os níveis azuis ao depósito areno-cascalhento.

Suscetibilidade magnética

Relativamente aos perfis de suscetibilidade magnética constata-se que este parâmetro varia entre os $-5x10^{-5}$ e cerca de $25x10^{-5}$. Estas variações encontram-se relacionadas com mudanças granulométricas (amostras E06VC, E12VC, E16VC e PDVC16). No entanto, noutras amostras, onde não ocorre variação granulométrica (E12VC 0-1,10 m), as variações da suscetibilidade magnética foram atribuídas ao maior/menor fornecimento de partículas magnéticas para o depositório.

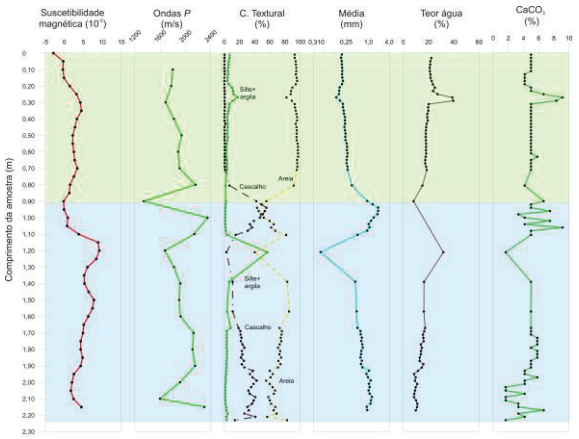


Fig. 4. Resultados dos ensaios laboratoriais da amostra E06VC.

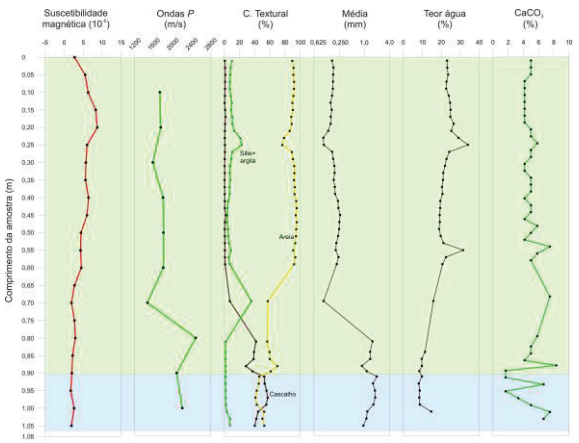


Fig. 5. Resultados dos ensaios laboratoriais da amostra E07VC.

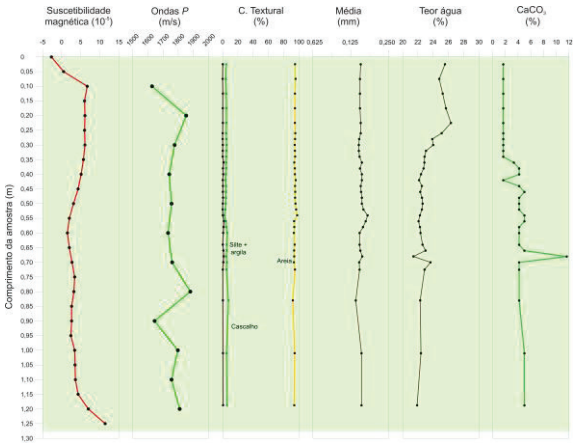


Fig. 6. Resultados dos ensaios laboratoriais da amostra E08VC.

Perfis de velocidade de propagação das ondas P

Estes perfis permitem individualizar os dois depósitos sedimentares presentes na área em estudo (Fig. 3). Assim, os sedimentos arenosos são caraterizados por velocidades de propagação que variam entre 1718 e os 1899 m/s, enquanto que os areno-cascalhentos são caraterizados por valores de propagação que variam entre 1954 e os 2518 m/s. Nos sedimentos areno-lodosos os valores são da ordem dos 1688 m/s. Os valores obtidos encontram-

se de acordo com os valores típicos obtidos por Hamilton (1980) para litótipos semelhantes.

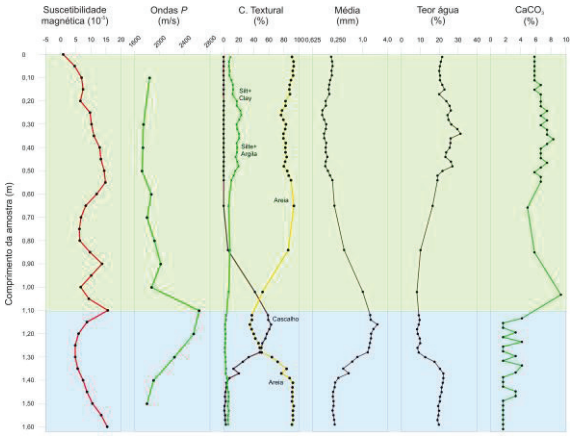


Fig. 7. Resultados dos ensaios laboratoriais da amostra E12VC.

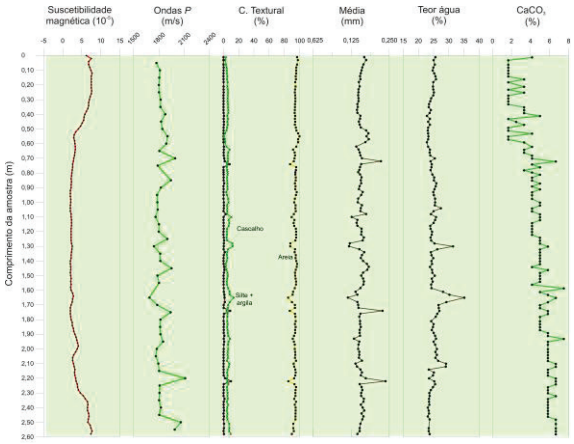


Fig. 8. Resultados dos ensaios laboratoriais da amostra E15VC.

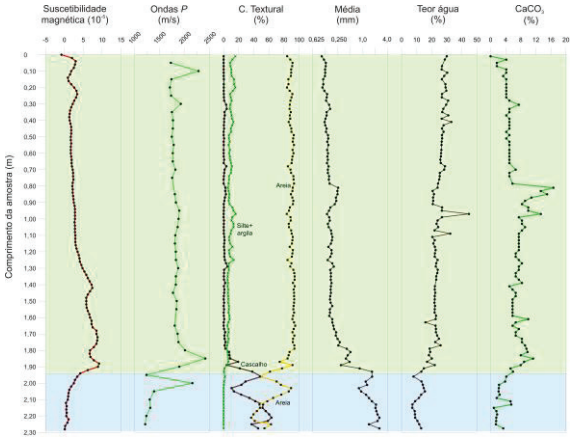


Fig. 9. Resultados dos ensaios laboratoriais da amostra E16VC.

Classificação textural e média dos sedimentos

De acordo com os resultados obtidos, constata-se, no geral, e na área de estudo, a existência de dois tipos de depósitos sedimentares. Um deles corresponde ao depósito arenoso formado por areias finas a muito finas, mal calibradas e com assimetria positiva (Fig. 12 e 13). O outro corresponde ao depósito areno-cascalhento formado por areia cascalhenta (média do sedimento varia entre -2 a 1,5 ϕ), mal calibradas e com assimetria variável, entre muito negativa a muito positiva.

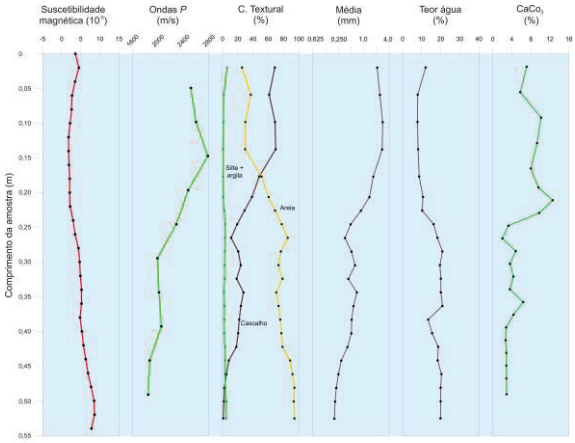


Fig. 10. Resultados dos ensaios laboratoriais da amostra E18VC.

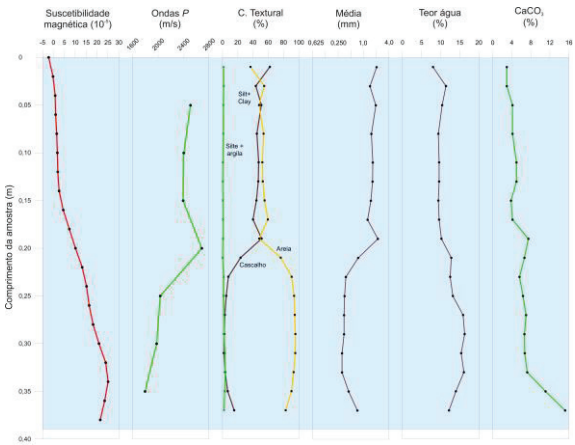


Fig. 11. Resultados dos ensaios laboratoriais da amostra PDVC16.

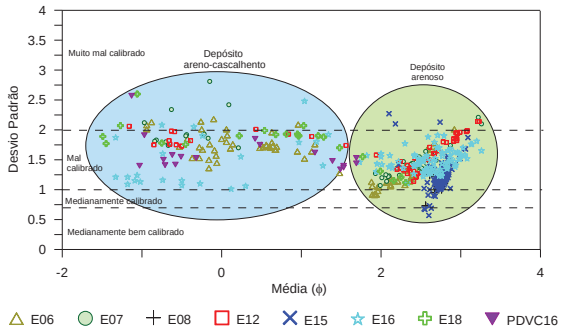


Fig. 12 – Caraterização textural dos sedimentos (média vs des. Padrão).

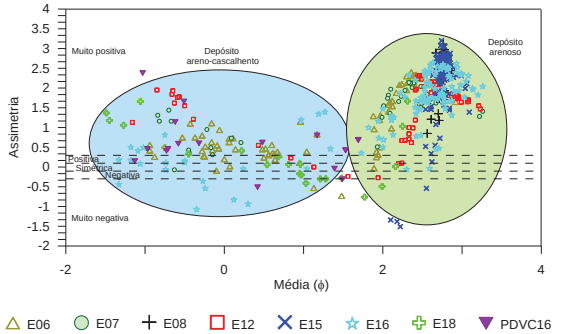


Fig. 13. Caraterização textural dos sedimentos (média vs assimetria).

Teor em água

Constata-se que o teor em água varia com a textura sedimentar, apresentando menores percentagens nas partículas mais grosseiras e maiores percentagens nas partículas finas. No geral, o teor em água nos sedimentos areno-cascalhentos é da ordem dos 14%, nas areias finas na ordem dos 23%, enquanto que nas areias lodosas e lodos arenosos é da ordem dos 30% e 40 %, respetivamente.

Conteúdo em carbonato de cálcio

Nos sedimentos analisados constata-se que o conteúdo em carbonatos é baixo pois varia entre 0 e 16%, registando-se os valores mais elevados no depósito arenoso.

3.4 Modelo sedimentológico

O modelo sedimentológico conceptual da área em estudo foi realizado a partir da interpretação sismo-estratigráfica dos perfis de reflexão sísmica apresentados em Pombo *et al.* (2015), e das caraterísticas sedimentológicas dos 8 testemunhos verticais indicados na Fig. 1, tendo-se relacionado a fácies sedimentar com o tipo de ambiente de deposição marinho e marinho-marginal (Fig. 14).

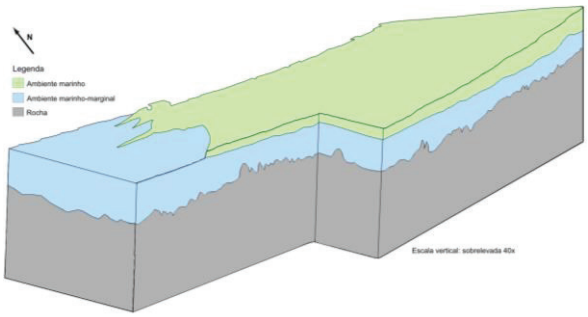


Fig. 14. Modelo sedimentológico.

Ambiente de deposição marinho

O ambiente de deposição marinho está representado pelo depósito arenoso que se encontra na zona leste, entre as batimétricas dos 30 m e 55 m (Fig. 3). No geral, são areias finas a muito finas mal calibradas e com assimetria positiva (Fig. 12 e 13), indicando que se trata de um depósito recente, com idade inferior a 5000 anos (Dias *et al.*, 2000). As partículas arenosas são dominadas pela componente siliciclástica, apresentando ainda fragmentos de moluscos (Pombo, 2004). Encontram-se atualmente em equilíbrio com os processos dominantes de fornecimento e de distribuição de partículas.

Ambiente de deposição marinho-marginal

O ambiente de deposição marinho-marginal é representado pelo depósito areno-cascalhento que apenas aflora na zona oeste, encontrando-se sob o depósito arenoso na restante área (Fig. 3). No geral, os depósitos deste ambiente são constituídos por partículas que variam entre o cascalho arenoso e a areia cascalhenta. São sedimentos mal calibrados e com assimetria variável, entre muito negativa e muito positiva (Fig. 12 e 13), não se coadunando com os processos atuais de fornecimento de partículas para a plataforma. Nesse sentido, estarão muito provavelmente relacionados com antigos cordões litorais contemporâneos de nível médio do mar localizado a uma cota mais baixa do que a atual (Dias, 1987; Dias *et al.*, 2000; Rodrigues, 2003).

4. CONCLUSÕES

A partir dos ensaios realizados às amostras verticais, colhidas na área em estudo, foi possível identificar dois tipos de depósitos distintos: os depósitos arenosos de ambiente marinho que se encontram em equilíbrio com os processos de dinâmica sedimentar actuais; e os depósitos areno-cascalhentos de ambiente de deposição marinho-marginal, representando antigos cordões litorais.

A análise dos dados obtidos, integrada com técnicas complementares de caracterização acústica e geofísica, mostrou-se adequada para a construção de um modelo sedimentológico de maior resolução do sector em estudo. Este modelo, associado ao modelo geotécnico, permite dimensionar adequadamente as estruturas de fixação ao subsolo marinho dos dispositivos das energias renováveis em *offshore*, reduzindo, assim, o fator de risco associado a este tipo de estruturas.

REFERÊNCIAS

Dias, J. (1987). *Dinâmica sedimentar e evolução recente da plataforma continental portuguesa setentrional*. T. doutoramento. U. Lisboa, 384 pp (não publicado).

Dias, J.; Boski, T.; Rodrigues, A.; Magalhães, F. (2000). Coast line evolution in Portugal since the last Glacial Maximum until presente – a synthesis. *Marine Geology*, 170 (1-2):177-186.

Hamilton EL (1980). Geoacoustic modeling of the sea floor. *J. Acoust. Soc. Am.*, 68(5):1313-1340.

Pombo, J.; Rodrigues, A.; Silva, A. Paula (2015). Seabed properties for anchoring floating structures in the Portuguese *offshore*. *Eng. Geology for Society and Territory* – Volume 6: 399-403. Springer 2015.

Rodrigues A. (2003). *Tectono-estratigrafia da plataforma continental setentrional portuguesa*. Tese de doutoramento, Univ. de Lisboa, 244pp.

Pombo, J. (2004). *Sedimentos superficiais da plataforma continental portuguesa entre o cabo Mondego e S. Martinho do Porto*. Tese Mestrado. Universidade de Coimbra (não publicado).

Evolução morfológica e sedimentar do porto de Portimão entre 2000 e 2015

L. I. Portela (1) e F. Duarte (2)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), lportela@lnec.pt.

(2) Administração dos Portos de Sines e do Algarve, filipa.duarte@apsinesalgarve.pt.

Resumo: Analisaram-se os processos de sedimentação no porto de Portimão, situado no estuário do rio Arade. O trabalho envolveu a comparação de nove levantamentos hidrográficos realizados entre 2000 e 2015. Foi tida em consideração a intervenção de dragagem executada em 2007-2008. Excluindo o efeito da dragagem, o canal de acesso e a bacia de manobra, à cota -8,0 m ZH, constituem a área do estuário que registou a taxa de sedimentação média mais elevada, sendo a taxa de sedimentação da bacia de manobra (0,07-0,09 m/ano), a montante, superior à do canal de acesso (0,03-0,04 m/ano), a jusante. Verifica-se alguma variabilidade entre levantamentos consecutivos, que não decorre necessariamente de uma efetiva evolução morfológica. Conclui-se que o porto apresenta condições de manutenção relativamente favoráveis, dado que o assoreamento da barra por captação de material sedimentar da zona costeira exterior é pouco significativo.

Palavras-chave: sedimentação, planeamento de dragagens, morfodinâmica, estuário do Arade, portos.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento dos processos de sedimentação nas áreas portuárias tem uma importância significativa não apenas para o planeamento da sua manutenção, mas também para o desenvolvimento de novas infraestruturas. Porém, em geral, esse conhecimento não se encontra disponível de forma sistemática, nem existe uma avaliação da incerteza associada à estimativa da evolução morfológica por comparação de cartas e levantamentos hidrográficos.

O porto de Portimão, situado no estuário do rio Arade (37º06,7' N; 008º31,6' W), possui o único terminal de cruzeiros da costa sul portuguesa. As principais infraestruturas portuárias localizam-se num sector com cerca de 3700 m de extensão, 900 m de largura máxima (anteporto) e 12 m de profundidade máxima (bacia de acostagem). A barra encontra-se protegida por dois molhes, poente e nascente, com comprimentos de 820 m e 680 m, respetivamente.

O estuário do rio Arade encontra-se profundamente modificado por obras portuárias exteriores e interiores e por dragagens, realizadas principalmente a partir da década de 40 (Weinholtz, 1980). Essas alterações são visíveis na comparação de planos hidrográficos históricos (1916 e 1961) e atuais: fixação da barra em 1947-1959; alargamento e aprofundamento do canal natural; redução das áreas entre-marés e praias interiores; estabelecimento de bacias de manobra; e criação de bacias portuárias de pesca e de recreio (Portela, 2013).

A hidrodinâmica é determinada, na zona interior, pelas correntes de maré (prisma de maré médio de $8,5 \times 10^6$ m^3) e pelas afluências fluviais (caudal médio da ordem de 10 m^3/s) e, na zona exterior, pela agitação marítima (altura significativa média de 0,8 m e máxima de 6,1 m, com duas gamas de direções dominantes, 120-140º, de levante, e 240-280º, atlântica; Fortes *et al.*, 2013). Os sedimentos são compostos por partículas de largo espetro dimensional, predominantemente misturas de areias finas a médias (>0,06 mm) e, principalmente na envolvente da bacia de manobra, materiais silto-argilosos (<0,06 mm; IH, 2002).

Admite-se que o rio Arade seja uma fonte sedimentar relevante. O trecho costeiro a poente do porto foi sujeito no passado a operações de alimentação artificial com areias dragadas no anteporto (Weinholtz, 1980). A nascente, a costa desenvolve-se em arriba.

Entre setembro de 2007 e março de 2008, foi executada uma dragagem de manutenção no canal de acesso, na bacia de manobra e na bacia de acostagem, num volume total de $0,435 \times 10^6$ m^3. Os dragados eram compostos por areias finas, materiais areno-lodosos e lodos, limpos (classe 1), com contaminação vestigiária (classe 2) ou ligeiramente contaminados (classe 3). Foi prevista a imersão dos dragados no mar, a 6-7 milhas náuticas do porto (IPTM, 2005). Não se realizaram outras dragagens no período em análise (Portela, 2010).

2. METODOLOGIA

Foram comparados levantamentos de 2000, 2003, 2005, 2007, 2008, 2009, 2010, 2014 e 2015, realizados pelo Instituto Hidrográfico para o Instituto Portuário do Sul, o Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos e a Administração dos Portos de Sines e do Algarve.

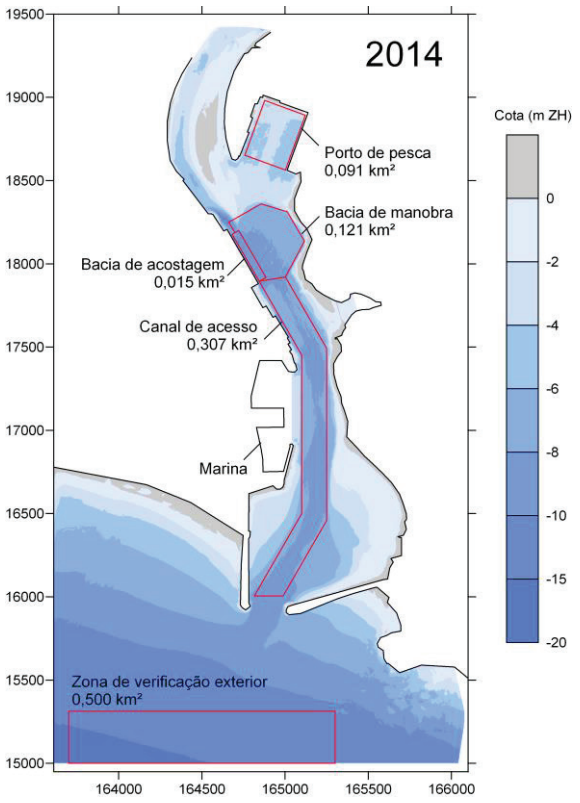


Fig. 1. Levantamento topo-hidrográfico de 2014 e localização das áreas analisadas.

Os levantamentos, nos sistemas Hayford-Gauss / Militares (até 2009) e PT-TM06 / Datum ETRS89 (desde 2010), apresentam algumas diferenças na área de cobertura. Por exemplo, não foram cobertos: em 2000, o trecho entre as pontes ferroviária e rodoviária; em 2005, algumas áreas acima do ZH; em 2009, parte do cabeço ou coroa; em 2010 e 2014, a marina de Portimão; em 2015, diversas áreas de menor interesse portuário.

Utilizou-se o programa Surfer (versão 8.04) para criar malhas com passo espacial de 2 m por triangulação e interpolação linear. Com base nestas malhas, foi calculada a cota média do fundo em diversas áreas. Foram também criadas malhas com a distribuição espacial da variação da cota do fundo entre levantamentos consecutivos.

Consideraram-se separadamente as seguintes áreas: (a) canal de acesso (0,307 km^2); (b) bacia de manobra, incluindo nesta a bacia de acostagem (0,136 km^2); (c) porto de pesca (0,091 km^2); (d) zona de verificação no exterior do porto (0,5 km^2; Figura 1). Na análise da evolução do canal de acesso e das bacias de manobra e de acostagem, foi tido em conta o facto de essas áreas terem sido dragadas em 2007-2008.

A zona de verificação exterior situa-se a cotas inferiores a -10 m ZH. Por se encontrar abaixo da profundidade de fecho tipicamente considerada na costa sul portuguesa (-8 m ZH), presume-se que seja relativamente estável, permitindo a identificação de eventuais situações anómalas.

3. RESULTADOS

A evolução da cota média do fundo, entre 2000 e 2015, encontra-se representada na Figura 2 para cada uma das áreas referidas: (a) canal de acesso; (b) bacia de manobra; (c) porto de pesca; (d) zona de verificação exterior.

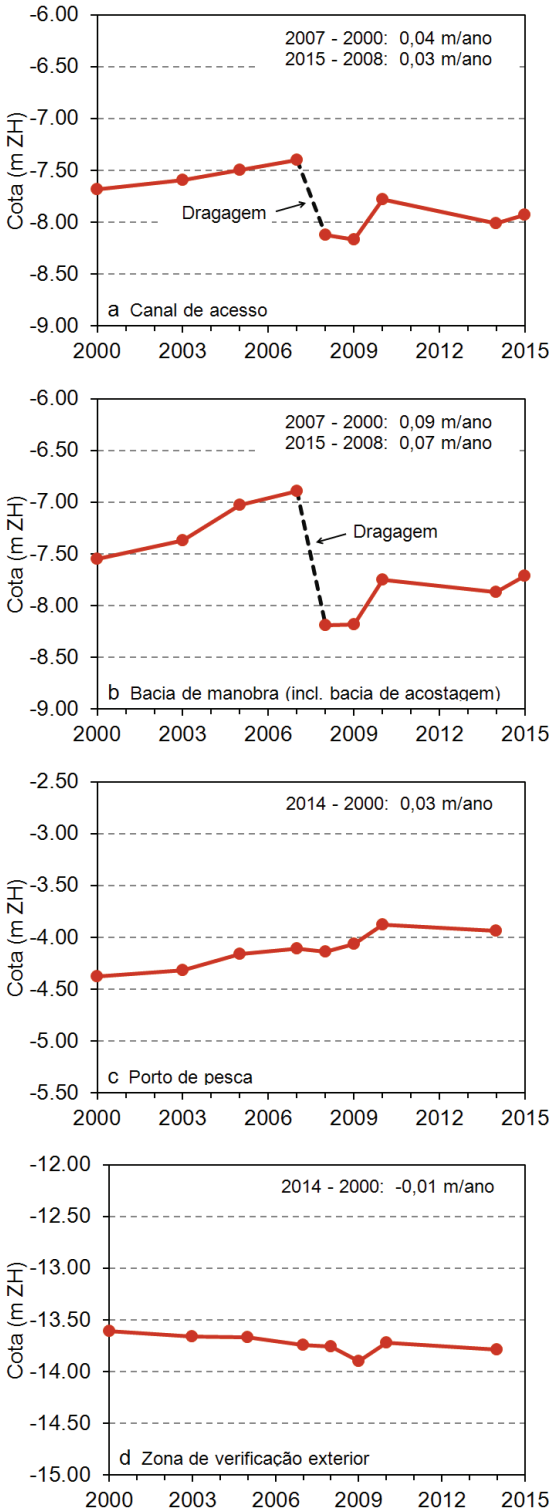


Fig. 2. Evolução da cota média do fundo: a Canal de acesso; b Bacia de manobra (incluindo bacia de acostagem); c Porto de pesca; d Zona de verificação exterior.

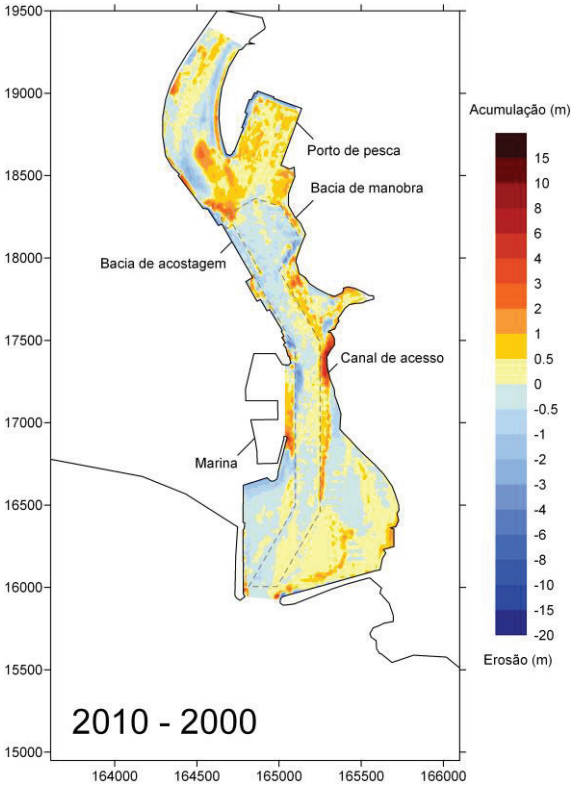


Fig. 3. Comparação de levantamentos hidrográficos: 2010-2000.

Na mesma figura, estão também indicadas as taxas de sedimentação médias entre 2000 e 2007 e entre 2008 e 2015, no caso do canal de acesso e da bacia de manobra, e entre 2000 e 2014, nas restantes áreas não dragadas.

A bacia de manobra e o canal de acesso, a -8,0 m ZH, exibem as taxas de sedimentação mais elevadas. Contudo, os valores na bacia de manobra (0,09 m/ano entre 2000 e 2007 e 0,07 m/ano entre 2008 e 2015), a montante, são superiores aos do canal de acesso (0,04 m/ano entre 2000 e 2007 e 0,03 m/ano entre 2008 e 2015), a jusante. Este resultado pode refletir a maior disponibilidade de sedimento a cotas próximas do ZH a montante da bacia de manobra, bem como a granulometria mais fina do material de origem fluvial e da própria envolvente da bacia de manobra. Refira-se ainda que na bacia de manobra se está a incluir a bacia de acostagem, dragada a -10,0 m ZH, mas que esta ocupa apenas uma pequena parte da área total.

O porto de pesca, com cotas da ordem de -4,0 m ZH e uma taxa de sedimentação média de 0,03 m/ano entre 2000 e 2014, exibe uma evolução consistente com os resultados apresentados para a bacia de manobra e o canal de acesso, dado situar-se a montante mas apresentar cotas mais próximas dos valores de equilíbrio.

A zona de verificação exterior apresenta cotas médias que variam num intervalo de 0,29 m, registando-se a maior variação entre levantamentos consecutivos nos anos de 2009 (-13,90 m ZH) e 2010 (-13,72 m ZH).

As comparações entre 2000 e 2010 (Figura 3) e, numa área mais restrita, 2014 e 2015 (Figura 4), evidenciando a distribuição espacial das áreas de erosão e acumulação, parecem confirmar que o anteporto, a jusante, não mostra uma tendência de sedimentação particularmente acentuada.

A Figura 5 apresenta a linha do zero hidrográfico (ZH) em levantamentos realizados com intervalo de cerca de 5 anos, permitindo analisar a evolução da zona a montante da bacia de manobra. Nos levantamentos de 2000 a 2010, observa-se um cabeço, ou coroa, situado acima do ZH, com uma taxa de deslocamento para sul de 15 a 7,5 m/ano. Entre 2010 e 2014, verifica-se a continuação dessa evolução (com aparente estabilização da frente do cabeço, mas rápido avanço do seu limite montante), estimando-se uma taxa de deslocamento para sul da ordem de 30 m/ano.

4. DISCUSSÃO

A realização de um número relativamente elevado de levantamentos hidrográficos (nove entre 2000 e 2015) torna o porto de Portimão um caso de estudo particularmente interessante do ponto de vista da análise da evolução morfológica.

Os resultados obtidos, nomeadamente na zona exterior, indicam que os levantamentos possuem a fiabilidade necessária para a avaliação da evolução morfológica do sistema e para o planeamento de dragagens, inclusivamente de natureza preventiva, pela autoridade portuária.

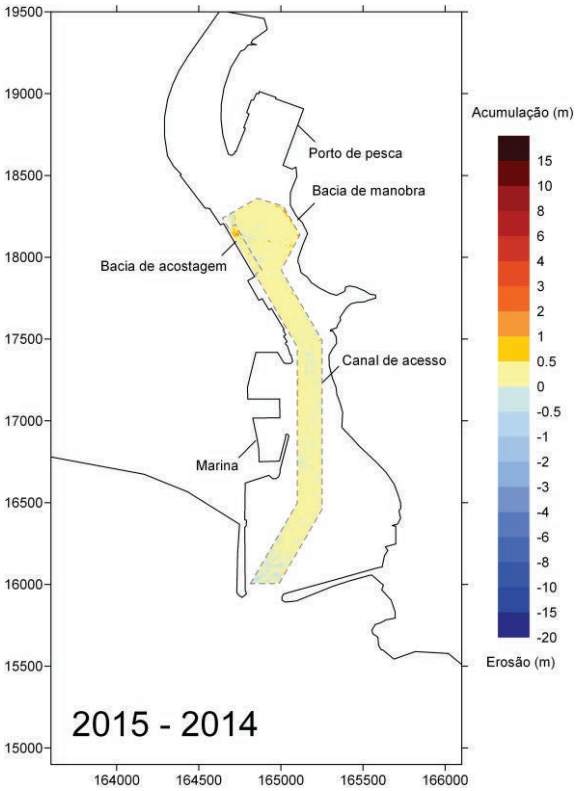


Fig. 4. Comparação de levantamentos hidrográficos: 2015-2014.

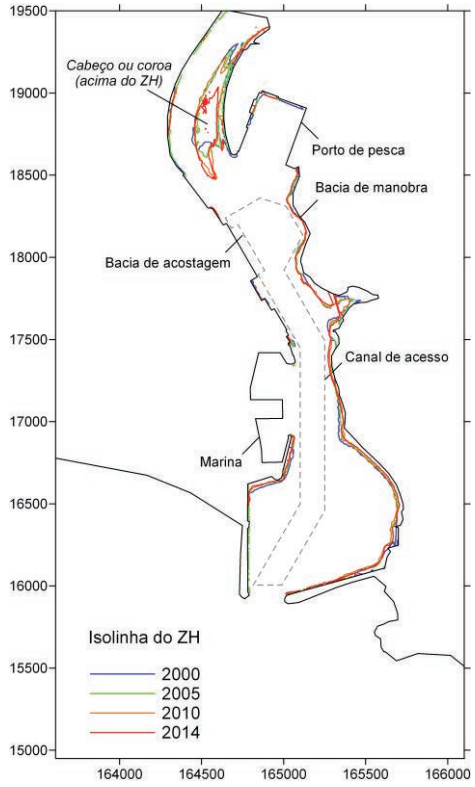


Fig. 5. Isolinha do Zero Hidrográfico em 2000, 2005, 2010 e 2014.

Verifica-se, todavia, alguma variabilidade entre levantamentos consecutivos, que não parece decorrer necessariamente de uma efetiva evolução morfológica.

Com efeito, na zona de verificação exterior, que se presume relativamente estável, a cota média do fundo obtida em 2014 (-13,79 m ZH) situa-se acima do valor de 2009 (-13,90 m ZH) e abaixo do de 2010 (-13,72 m ZH). A mesma sequência é observada na bacia de manobra, no canal de acesso e no porto de pesca. Esta consistência na evolução de todas as áreas, em 2009, 2010 e 2014, sugere que a variação observada decorrerá principalmente de aspetos metodológicos relacionados com a execução dos levantamentos hidrográficos.

Um grau de incerteza correspondente a um intervalo máximo de 0,3 m afigura-se um valor admissível em estudos de evolução morfológica por comparação de levantamentos.

5. CONCLUSÕES

O porto de Portimão apresenta condições de manutenção relativamente favoráveis. Com efeito, o canal de acesso e a bacia de manobra, zonas mantidas por dragagem a -8,0 m ZH, apresentam taxas de sedimentação inferiores a 0,10 m/ano.

A circunstância de a área dragada ocupar uma parte significativa da área total do sector inferior do estuário contribui provavelmente para minimizar os fenómenos de assoreamento.

As taxas de sedimentação, mais elevadas na bacia de manobra do que no canal de acesso, e a evolução das isolinhas do ZH sugerem que o material sedimentar responsável pelo assoreamento seja principalmente proveniente de montante.

O assoreamento da barra por captação de sedimento da zona costeira exterior é aparentemente pouco relevante. Esta situação difere da que se observa nos portos da costa ocidental portuguesa em trecho arenoso, onde a sedimentação nas barras por captação de material ao trânsito sedimentar litoral é geralmente muito significativa.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Administração dos Portos de Sines e do Algarve S.A. a autorização concedida para a publicação deste estudo.

REFERÊNCIAS

Fortes, C., Portela, L., Rodrigues, M., Capitão, R., Fortunato, A., Pinheiro, L., Freire, P., Silva, L.G., Azevedo, A. (2013). Avaliação da reconfiguração da barra do Porto de Portimão e da dragagem de estabelecimento do canal de acesso ao porto. Volume 4: Avaliação comparativa da situação atual e de cenários de desenvolvimento. Relatório 334/2013-DHA/NPE/NEC, LNEC, Lisboa.

IH (2002). Caracterização físico-química de sedimentos, na área do Porto de Portimão e barra. Rel.TF.GM.02/02, Instituto Hidrográfico, Lisboa.

IPTM (2005). Dragagem do canal de acesso, bacia de manobra e bacia de acostagem do Porto de Portimão, cabeço assoreado em frente à capitania e bacia do cais Gil Eanes. Projeto de dragagem. Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos, Delegação do Sul.

Portela, L.I. (2010). Planos plurianuais de dragagens portuárias 2011-2015. Volume 3: Zona sul. Relatório 376/2010-NEC, LNEC, Lisboa.

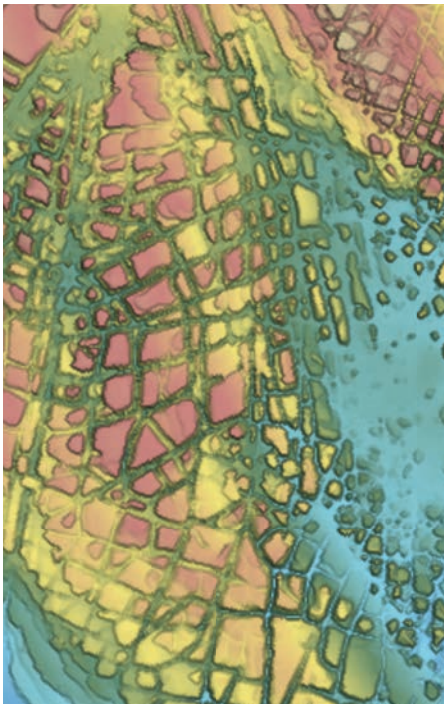
Portela, L.I. (2013). Avaliação da reconfiguração da barra do Porto de Portimão e da dragagem de estabelecimento do canal de acesso ao porto. Volume 1: Previsão de taxas de sedimentação no canal de acesso. Relatório 85/2013-DHA/NEC, LNEC, Lisboa.

Weinholtz, M.B. (1980). Anteporto de Portimão e praia da Rocha. Evolução. Direcção-Geral de Portos, Lisboa.

SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E GESTÃO DE DADOS DO AMBIENTE MARINHO

4as JORNADAS DE ENGENHARIA HIDROGRÁFICA

21, 22 E 23 DE JUNHO DE 2016



Estado da Arte nas Base de Dados dos Dados Maregráficos e Cruzeiros Científicos

A. Lopes (1), F. Gomes (1), B. Inácio (1), E. Magalhães (1), A. Branquinho (1), F. Vasquez (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa; ana.lopes@hidrografico.pt; fernando.gomes@hidrografico.pt.

Resumo: Ao longo dos últimos 20 anos, o Instituto Hidrográfico (IH) tem vindo a desenvolver base de dados (BD) em diferentes áreas funcionais.
Em 1995, deu-se início ao desenvolvimento da BD de Marés com o intuito de arquivar, disponibilizar e georreferenciar dados observados, previsões de altura de maré e de pressões atmosféricas. Ao longo do tempo, o modelo de dados existente ficou obsoleto o que levou ao desenvolvimento de um novo modelo - Tide. Neste novo modelo, alargou-se o objetivo à aquisição e arquivo dos dados em tempo quase real. A disponibilização dos dados da BD Tide evoluiu de modo a alcançar diversas soluções para diferentes utilizadores.
No mesmo período, foi criada uma BD de cruzeiros de investigação científica estrangeiros com o objetivo de gerir e administrar a informação relativa aos pedidos de parecer para a realização de trabalhos em águas sob soberania e jurisdição nacional. Ao longo de duas décadas, o sistema de informação conheceu diversos desenvolvimentos, sendo hoje um sistema de informação modular que integra uma BD e um Web SIG.

Palavras-chave: Base de dados, sistema de informação geográfica, marés, cruzeiros científicos.

1. Introdução

O estado da arte dos dados maregráficos passa não só pela evolução tecnológica das estações maregráficas, tal como, pela evolução do processo de arquivo dos dados. Neste artigo é apresentada uma breve descrição cronológica da implementação das estações, do arquivo, da aquisição e transmissão dos dados. O objetivo final é mostrar, como podemos obter os dados e transmiti-los em tempo quase real.

Em paralelo, o artigo aborda a gestão dos processos de parecer do IH, para a realização de atividades científicas, por entidades estrangeiras, em áreas marítimas sob jurisdição nacional e descreve os componentes do sistema de informação de cruzeiros científicos, no domínio das base de dados, tanto na visualização, como na difusão da informação geográfica.

2. Dados Marégraficos

2.1. Do Maregrama à Era Digital

O estudo científico do nível do mar tem que ser, necessariamente, constituído por longas séries de medições. A primeira Tabela de Marés foi publicada em 1945, referente a previsões para o ano de 1946, pela Direção dos Serviços de Hidrografia, Navegação e Meteorologia Náutica da Direção Geral da Marinha. Na Tabela de Marés de 1946 constam previsões para as estações maregráficas de Leixões, Aveiro, Cascais, Lisboa, Lagos, Vila Real de Santo António, Funchal, Horta e Ponta Delgada. Para que a Tabela de Marés fosse publicada, houve a necessidade de adquirir séries de observações maregráficas para o cálculo das constantes harmónicas e possibilitando a melhoria das previsões.

Atualmente, a Rede Maregráfica Nacional é constituída por 19 estações de medição que são da responsabilidade do Instituto Hidrográfico (17) e da Direção Geral do Território (2).

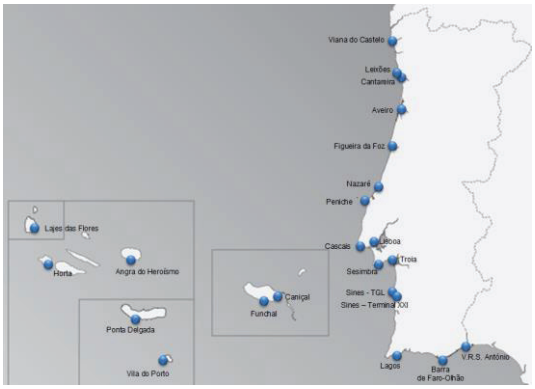


Fig. 1. Rede Maregráfica Nacional e alguns portos secundários.

Ao longo do tempo houve a necessidade e a possibilidade da instalação de vários sensores nos mesmos locais a fim de haver redundância nas medições para uma maior fiabilidade no cálculo das previsões de maré. As estações maregráficas principais não são as únicas colocadas ao longo da costa portuguesa, são colocadas outras em locais não tão relevantes mas importantes para o estudo da maré, designadas por estações maregráficas secundárias, com o intuito de validar as previsões e

as concordância. Existem também estações nómadas ou de campanha para estudos específicos ou temporários.

Na instalação das estações maregráficas utilizam-se marcas de nivelamento da Rede de Nivelamento Geométrico de Alta Precisão para os dados estarem referenciados ao zero hidrográfico. A estação maregráfica pode ainda ter acoplado um sensor de pressão atmosférica.

Atualmente, temos a recolha e transmissão dos dados das estações em tempo quase real, sendo a aquisição dos dados de segundo a segundo, e posteriormente feita a média de minuto a minuto.

2.2. Do papel à Base de Dados Tide

A evolução da instrumentação citada foi estrondosa desde os meados do século XX até aos nossos dias. Nos anos 60 e 70, o estudo da maré era feita pelo marégrafo flutuador – Maregrama, com registo em papel e digitalizados manualmente para suporte informático. Entre os anos 80 até 2004, os sensores de medição evoluiram para o marégrafo de flutuador (Thales), o marégrafo de pressão e o marégrafo acústico, tendo como caraterística a capacidade de registo digital. O marégrafo atual não é nada mais do que um *datalogger* que permite a ligação a vários sensores (radares, pressão, etc.) e disponibiliza a informação, via internet, em tempo quase real. O acesso aos marégrafos pode ser feito remotamente para configurar e atualizar tanto o firmware como o software instalado.

A diversidade, a quantidade de dados e metadados resultantes das estações maregráficas levou à criação da primeira base de dados - Marés, em 1996. A BD foi desenvolvida utilizando ferramentas Oracle. A BD Marés teve como objectivo a inserção de dados históricos e recentes, atualização, eliminação e seleção dos dados. Previa ainda o cálculo da análise harmónica, previsões de maré e a criação de novas Listas de Ondas Separáveis, não trazendo benefícios aos responsáveis e utilizadores da área funcional das marés. Os utilizadores viam a BD, mais como uma tarefa diária, e não como uma ajuda no arquivo e seleção dos dados. Durante a utilização da aplicação, foram detetados *bugs* os quais não tinham solução na versão das ferramentas de desenvolvimento Oracle utilizadas.

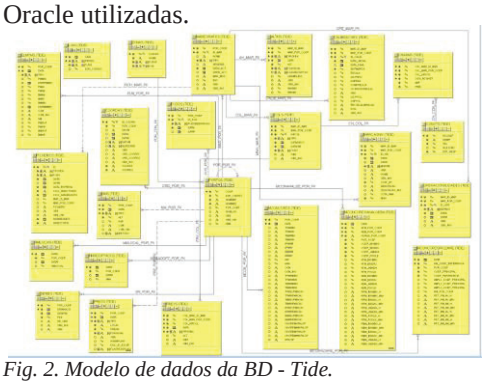


Fig. 2. Modelo de dados da BD - Tide.

Com a evolução tecnológica das estações maregráficas, e tendo como objetivo a disponibilização dos dados em tempo quase real foi desenhado um novo modelo de dados, surgindo uma nova BD, a BD – Tide, implementada num Sistema de Gestão de Base de Dados (SGBD) Oracle 11g®.

A BD Tide tem como finalidade guardar todos os metadados e dados já previstos na BD - Marés, excepto a parte de cálculo da análise harmónica e das previsões. Os temas abordados na BD - Tide estão descritos na figura no. 3.



Fig. 3 - Menu Principal da aplicação da BD - Tide.

Aqui são armazenados dados em tempo quase real e dados em tempo diferido. Atualmente, os metadados são introduzidos pelo utilizador e a maioria dos dados são inseridos de forma automática e sistemática na BD, por URL ou FTP, como ilustrado nas figuras no. 4 e 5. Os dados inseridos em tempo diferido dizem respeito a dados históricos ou de acordo com o tipo de marégrafo, por exemplo, o Level Troll que não suporta esta funcionalidade.

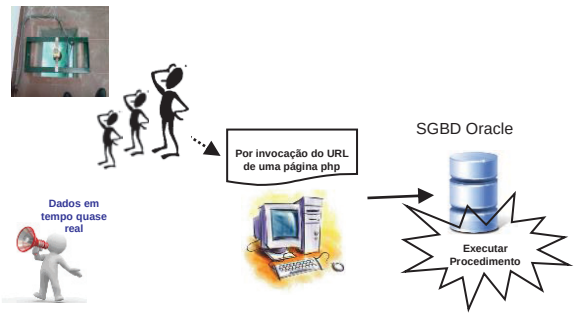


Fig. 4. Transmissão em tempo quase real por URL.

Para o carregamento dos dados em modo diferido foi definido um conjunto de regras:
- Estrutura de diretórios pré-definida onde o utilizador coloca os ficheiros que pretende inserir na BD;
- Ficheiro *.ctl (*SQL Loader – Control File Reference*), que faz de interprete do ficheiro de dados a inserir com a estrutura do modelo de dados (tabelas) da BD;
- Tarefa que é executada com a periodicidade desejada.

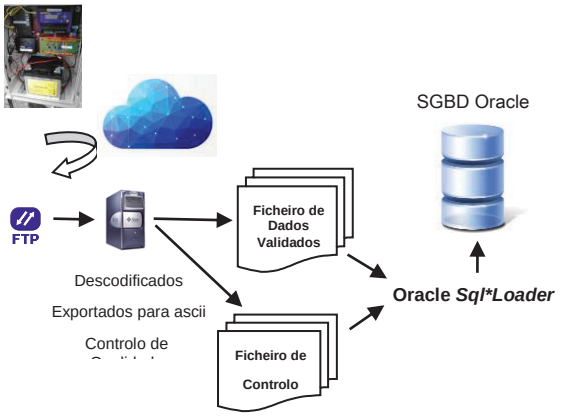


Fig. 5. Transmissão em tempo quase real por FTP.

Todos os dados inseridos na BD têm *flag* de aquisição e de qualidade. A *flag* de aquisição refere-se à maneira como os dados são guardados, se em tempo diferido ou quase real. Por outro lado, a *flag* de qualidade define a qualidade do dado. Aqui são aplicados seis critérios (sem Controlo, Bom, Provavelmente Bom, Mau, Provavelmente Mau, Interpolado e Falha).

A aplicação feita à medida para o utilizador contém um conjunto de formulários, relatórios e a extração de ficheiros de dados (*.txt), como se ilustra na figura no. 6.

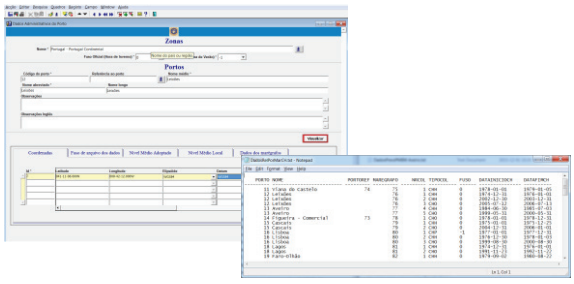


Fig. 6. Outputs da aplicação feita à medida.

Os dados da BD – Tide estão disponíveis no portal da Internet do IH – Previsões de Maré e Mapa de Concordâncias, e em portais para uso exclusivo de parceiros do IH – Dados Observados de Maré e de Pressão Atmosférica – Figura no. 7.

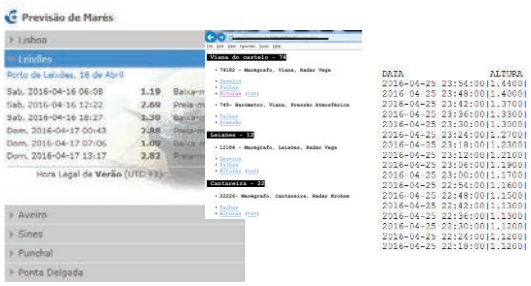


Fig 7. Portal do IH – Previsão Maré e Portal – Dados Observados de Maré e de Pressão Atmosférica.

3. Gestão de Cruzeiros de Investigação Científica Estrangeiros

3.1. Enquadramento

As áreas marítimas sob jurisdição nacional são frequentemente requisitadas por entidades estrangeiras para a realização de cruzeiros de investigação científica.

A realização desde tipo de atividade depende da autorização do Estado Português, através do Ministério dos Negócios Estrangeiros (MNE). No processo de autorização emitem pareceres diversas entidades nacionais, incluindo o IH.

Para formalizar o pedido, as entidades estrangeiras que pretendam realizar atividades de investigação científica marinha em território português devem, até 6 meses antes da data prevista para o início dos trabalhos, efetuar os pedidos às autoridades nacionais. De acordo com o artigo 19.º do Decreto-Lei n.º 52/85, os pedidos de autorização devem ser acompanhados dos seguintes elementos:
a) Natureza e objecto das atividades;
b) Métodos e meios a utilizar, características dos navios ou outras estruturas flutuantes e a descrição de equipamento específico;
c) Áreas geográficas exatas onde se pretende desenvolver a atividade, bem como os portos nacionais de escala;
d) Datas previstas de chegada e partida dos navios de investigação e de remoção de equipamentos;
e) Identificação da entidade, respetivo diretor e elementos responsáveis pelos trabalhos;
f) Indicação das disponibilidades existentes para a participação de cientistas ou técnicos portugueses no cruzeiro.

Os pedidos de autorização só poderão ser considerados, desde que tenham, por objeto águas não selecionadas para fins de defesa, prospecção ou proteção do ambiente, e desde que as atividades prossigam com fins pacíficos e utilizem métodos científicos e técnicos, que não interfiram com a preservação do meio aquático nem com os recursos e património subaquático.

De acordo com o n.º 2 do artigo 20º do mesmo Decreto-Lei, as entidades estrangeiras devem fornecer ao Estado Português os relatórios preliminares, os resultados e as conclusões finais, e permitir o acesso aos dados e amostras recolhidas no âmbito dos projetos de investigação científica.

3.2 O Sistema de informação de gestão de cruzeiros

No âmbito do processo de autorização, o IH tem a incumbência de elaborar pareceres de caráter técnico-científico, onde participam especialistas nas áreas da oceanografia, hidrografia, geologia marinha, navegação, química e poluição do meio marinho, e de solicitar cópias da informação recolhida pelos cruzeiros científicos, nomeadamente os relatórios científicos e os dados.

A gestão dos processos de pedidos de parecer no IH é realizada através de um sistema de informação desenvolvido à medida, cuja origem remonta a 1995.

Ao longo de duas décadas, o sistema de informação conheceu diversas melhorias no modelo e atualizações tecnológicas, começando por ser uma aplicação desenvolvida em Microsoft Access, com informação administrativa, para passar a ser uma plataforma modular que integra um modelo de dados relacional, assente num sistema de gestão de base de dados, e um Web SIG.

Genericamente, o sistema atual tem uma arquitetura com três níveis lógicos, constituído pelos serviços de visualização, de negócio e de dados. O serviço de visualização refere-se à interface gráfica de interação com o utilizador. O serviço de negócio é constituído pelos objetos, componentes e classes que contêm um conjunto de procedimentos e comandos de acesso e manipulação dos registos da base de dados. O serviço de dados, corresponde à base de dados propriamente dita, a qual interage com as diferentes componentes dos serviços de negócio.

O módulo BD está implementado num Sistema de Gestão de Base de Dados Oracle 11g® com a componente espacial para o armazenamento das componentes geométricas e descritivas dos objetos geográficos, assim como os elementos administrativos do processo (informações sobre as instituições, projetos de investigação, navios, relatórios, tipos de dados a recolher, instrumentos a utilizar, etc.).

O módulo Web SIG (aplicação para a visualização e inquirição de dados geográficos numa interface web) é constituído por um serviço de mapas que permite visualizar e difundir a informação geográfica e administrativa, associada aos cruzeiros, nomeadamente a localização da realização dos trabalhos (áreas, trajetos, estações, amarrações), o domínio científico, o objetivo do projeto ou o tipo de dados a adquirir, bem como a disponibilização de funcionalidades de pesquisa, identificação, análise espacial e de consultas espaciais e lógicas.

O sistema de informação implementado permite carregar informação geográfica e alfanumérica, consultar e cruzar grandes quantidades de registos, extrair informação sistematizada, produzir relatórios à medida, bem como administrar e controlar os pedidos realizados pelo IH às diferentes instituições responsáveis pelos dados e gerir eficazmente a solicitação de cópias de relatórios científicos relativos às campanhas efetuadas.

3.3 Informação Estatística 1995-2015

Ao longo de duas décadas, o IH tomou conhecimento de 626 cruzeiros de investigação científica estrangeiros em águas nacionais, o que correspondeu a 22 329 de dias de trabalhos no mar. Desses cruzeiros, 70% foram realizados na Zona Económica Exclusiva (ZEE) do Continente, 23% na ZEE dos Açores e 7% na ZEE da Madeira. Os países que solicitaram mais pedidos de autorização foram a França (27%), Alemanha (24%), Espanha (14%) e Reino Unido (14%). Em média foram efetivamente realizados 31 cruzeiros por ano, sendo que os anos de maior atividade ocorreram em 1997 e 2010 com 49 e 43 cruzeiros realizados, respetivamente.

4. Conclusão

A evolução tecnológica das estações maregráficas assim como o arquivo, a transmissão e a disponibilização dos dados em tempo quase real é útil para um rápido acesso aos dados e metadados, com o objetivo de dar respostas rápidas e eficazes para:
- Navegação em zonas costeiras e em águas restritas;
- Execução de projetos de engenharia costeira;
- Processos biológicos ou geológicos;
- Pesca e atividades recreativas;
- Operações portuárias;
- Monitorização de sobre-elevações de tempestade;
- Sistema de alerta de *tsunamis*.

O arquivo rápido dos dados, com menor intervenção humana, permite minimizar os erros na inserção dos dados na BD. A BD Tide permite a disponibilização de dados maregráficos, em diferentes formatos, para um vasto leque de utilizadores. Os dados armazenados na BD tem aplicado o controlo de qualidade.

O sistema de informação para a gestão dos cruzeiros de investigação científica estrangeiros é uma importante ferramenta no tratamento e análise da informação administrativa e geográfica das campanhas oceanográficas, e um meio fundamental para controlar os cumprimentos dos prazos dos pedidos de autorização e dos respetivos envios das cópias dos relatórios e dos metadados dos dados adquiridos.

Agradecimentos

Agradecemos ao CTEN. Pinto da Silva, 1TEN Castro Veloso, 2TEN Sónia Godinho, Drª Ana Nobre e Drª Célia Pata, pelo apoio e revisão dos temas desenvolvidos neste artigo.

Assessing coastal erosion risk in a GIS environment

A. Bio (1), J. A. Gonçalves (1,2), M. Arcos Santos (2), H. Granja (1), J. Pinho (3), L. Bastos (1,2)

(1) Interdisciplinary Centre of Marine and Environmental Research (CIIMAR/CIMAR), University of Porto, Rua dos Bragas 289, P 4050-123 Porto, Portugal

(2) Department of Geosciences, Environment and Spatial Plannings, Faculty of Sciences, University of Porto, Rua Campo Alegre 687, 4169 - 007 Porto, Portugal

(3) Centre for Territory, Environment and Construction, Department of Civil Engineering, University of Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

Abstract: Coasts are complex and dynamic zones, susceptible to natural and man-made risk factors and hazards. Impacts will depend on meteo-oceanic conditions (e.g. wave and storm patterns), vulnerability (related with sediments and morphology) and exposure (which depends on coastal orientation and on natural or man-made protective structures). Consequently, even neighbouring beach sectors may show contrasting behaviour because of distinct features. A practical local beach characterization is hence useful for coastal mapping and management.
We present procedures for coastal erosion risk assessment in a GIS environment. The effect of exposure on beach dynamics is analysed, considering local characteristics, like shoreline orientation (determined using a poly-line simplification algorithm), beach type and human interventions (determined in-situ), and relating these features to beach dynamics, such as shoreline position, beach area and beach volume determined from successive Digital Elevation Models, using several GIS tools. A case study for the Vila Nova de Gaia coast (Northern Portugal) is presented.

Key words: GIS, Digital Elevation Models, beach, exposure, morphodynamics

1. INTRODUCTION

Coasts are complex and dynamic yet often highly populated and developed zones, which have suffered increasing anthropic pressure. These zones present short-term changes, of seasonal nature, which can be marked after storm events or, to long-term trends related e.g. to human interventions (such as, sediment depletion, man-made changes of morphology caused by dams and buildings, or local long-shore drift changes caused by groins, jetties or breakwaters) or natural processes, such as climate change. Coasts and particularly beaches are often prone to erosion (Ciavola *et al.*, 2011), a phenomenon that has received increasing attention during the past decade (Jiménez *et al.*, 2011), as predicted sea level rise and increased storminess due to climate change are likely to increase the susceptibility of coastal areas and negative impacts.

Coastal dynamics depend on local meteo and ocean climate (e.g. wave and storm frequency and intensity, probability of hazards), vulnerability (related to materials/sediments, human occupation, morphology and other factors affecting resilience) and exposure (which depends on the geographic setting, coastal orientation and on natural or man-made protective structures). Consequently, even neighbouring beach sectors may show contrasting behaviour because of their distinct features (Forbes *et al.*, 2004), which is challenging for coastal management.

Geographic Information System (GIS) technologies are valuable tools for storage, management, analysis, and display of spatial data (Burrough and McDonnell, 1998), and most local authorities have already GIS in place for infrastructure and property management.

Here, GIS procedures for coastal characterisation and erosion risk assessment are presented using Digital Elevation Models (DEM) of the Vila Nova de Gaia coast (Northern Portugal) as a case study. We show how beaches can be classified and segmented and how their dynamics and exposure can be quantified in a GIS environment.

2. METHODS

2.1. Data

Data were obtained from a multi-disciplinary monitoring program, set up to follow and quantify short-term changes of the densely occupied and locally erosion-prone Vila Nova de Gaia coast (N-Portugal; Fig. 1) (Bio *et al.*, 2015).

DEM were obtained through aerial photogrammetry, using high-resolution (7680×13824 pixels, 10 cm ground sampling distance) aerial photos taken in November 2008, April and November 2009 and May 2010 (Gonçalves *et al.*, 2011). DEMs were computed from the pairs of stereoscopic aerial images after extracting correlated points through stereo-matching, using the BLUH software

(Jacobsen, 2000; Rieke-Zapp and Nearing, 2005) and resampled to 1 m resolution.

The beaches had been previously classified, *in situ*, into five types: rocky (outcrops with little sand), sandy (clastic) with outcrops, sandy with frontal dune, sandy with frontal dune and outcrops, and intervened (i.e. partially armoured) (Garnja and Pinho, 2014).

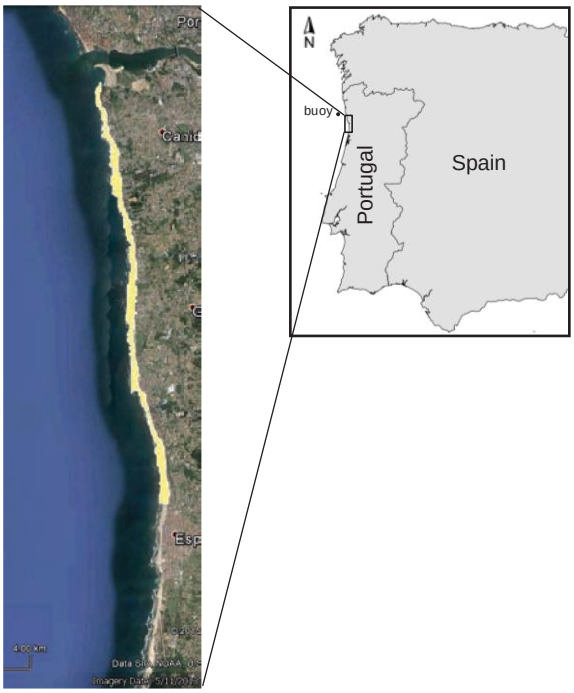


Fig. 1. The Vila Nova de Gaia coast in N-Portugal.

2.2. GIS analyses

DEMs were analysed using ArcGIS (version 10.2.1) to obtain shoreline position (here, we considered the isoline 1 m above MSL to quantify shoreline movements), beach slopes and beach areas and volumes, and to allow quantification of shoreline movements and sedimentary budgets between surveys (Table I).

The first survey (DEM1) was used to determine the base-line conditions for the beach dynamics analyses (Fig. 2). To divide the study area into segments of a given orientation, the isoline of 1 m above Mean Sea Level (MSL), extracted from DEM1 and manually corrected to bridge discontinuities (at 1:1250 map scale), was simplified using the Douglas-Peucker algorithm (Douglas *et al.*, 1973) with a maximum tolerance of 25 m. At the centre of each segment, a perpendicular line was drawn to extract a beach profile for each DEM.

To allow for comparisons between the different beach segments, some with dunes, others limited by close-to-shore buildings, a standardised approach was necessary. Beaches stretched from about 30 m to about 90m onshore, reaching mostly less than 6 m elevation above MSL. Therefore, we only analysed the beach area between 1 m and 4 m elevation above MSL.

Table I. ArcGIS tools used in this study.

Purpose	Tool
Coastline simplification	Editing tools > Generalize
Division of coastline polyline into segments	Data Management tools > Features > Split Line at Vertices
Segment length, direction and centre	Spatial Statistics toolset > Measuring Geographic Distributions > Linear Directional Mean
Central profiles for all segments	3D Analyst Tools > Functional Surface > Stack Profile
Beach zone (1–4m above MSL) selection	Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator
Delimiting beach area per sector	Analysis Tools > Proximity > Buffer (End Type = flat, Dissolve Type = NONE)
Beach area and volume per elevation level	*MultiVolumes 10_0 > Multi-Volumes For ArcGIS 10 and 10.1*

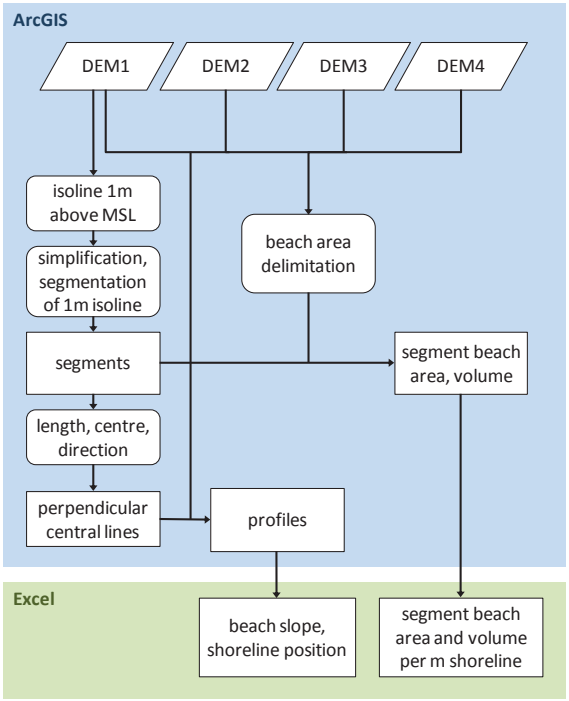


Fig. 2. Procedures to obtain beach slope, shoreline position, area and volume for each survey and segment.

For each segment and survey, the beach area (we used the 3D area computed in ArcGIS) and volume were determined, considering the beach between 1 m and 4 m elevation, with lateral segment limits drawn perpendicularly to the coastal segment (Fig. 3). Volumes were obtained for each 1 m elevation interval (i.e. for 1 m slices of the DEM) using the MultiVolumes 10_0 tool (Table 1).

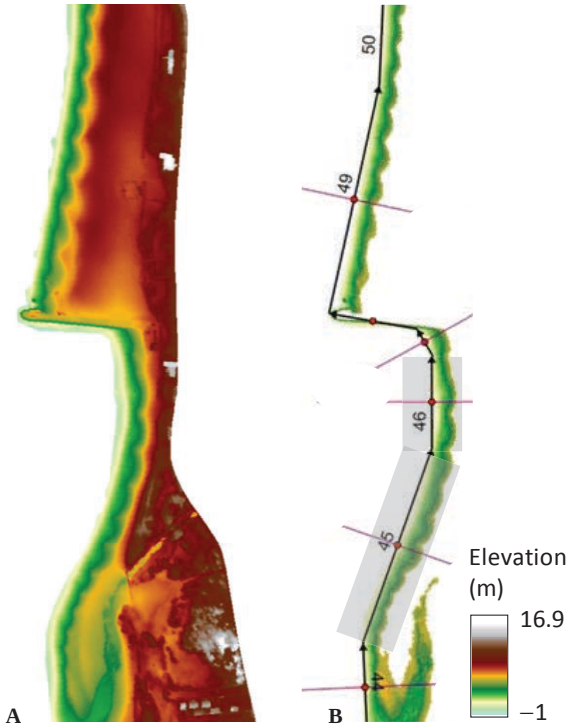


Fig. 3. A: part of DEM1 (14 November 2008, Canidelo beach); B: the beach area and segments, with respective centroids and perpendicular profile lines, as well as the rectangular buffers used to calculate segment beach area and volume.

2.3. Beach morphodynamics

The profile data were exported to Excel for plotting (Fig. 4) and to determine shoreline position (i.e. extracting the position where the profile shows 1 m elevation, interpolating, if necessary, between the profile values above and below 1 m elevation) and slope (obtained through linear regression, using the profile's elevation values between 1 m, or the closest lower value, and 4 m, or the closest higher value) (Figs 2 and 4).

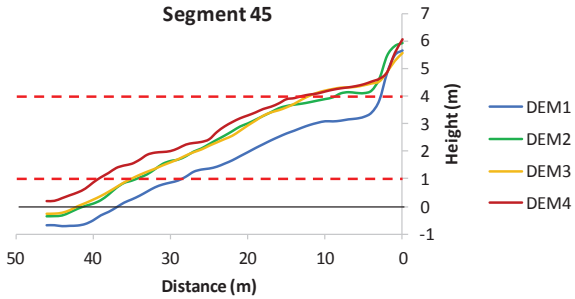


Fig. 4. The central profiles for segment 45 (Canidelo beach), with delimitation of the analysed beach area (i.e. between 1 m and 4 m elevation above MSL, as indicated by the red dashed lines). This segment shows accretion between November 2008 and May 2010.

ArcGIS results for segment area and volume were saved as text files and read into Excel (for plotting) and into R (for analysis; R Development Core Team, 2010). Differences between surveys were divided by segment length to obtain a comparable measure of erosion/accretion for the different segments. Beach dynamics – i.e. changes in shoreline position, beach area and volume – was subsequently analysed considering: beach orientation (which determines vulnerability to wave and wind impacts, given the dominant high-wave and strong-wind directions); beach slope; and beach type.

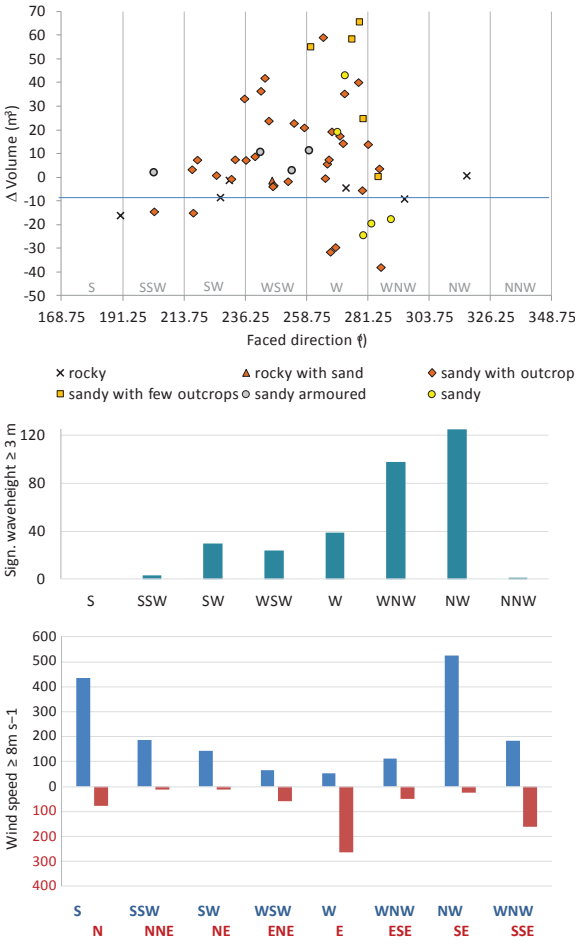


Fig. 5. Changes in volume between November 2008 and May 2010, per m shoreline and beach segment, plotted against shoreline facing direction and identifying beach type, number of 3-hour periods with wave heights ≥3 m, and hours of maximum wind speeds ≥8 m s^{-1}. Seaward blowing winds are presented in red, opposite to landward blowing winds.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Of the 62 segments obtained, 3 had no beach (being jetty or breakwater faces) and were not considered for analysis. Segment lengths varied between 36 m and 761 m (mean = 244.3 m), and segments were facing S (one northern rocky beach and a breakwater-protected sandy beach) to NW (mean facing direction = 254º, i.e. WSW). Slopes varied considerably, between 1º and 32º; sandy beaches tended to be less steep than rocky beaches.

The dynamics, analysed using R software, varied between segments and, for the same segment, between different surveys. Segment shorelines

migrated between 14 m inland and 33 m seaward (see example Fig. 4), moving, on average, 1.6 m seaward. Changes in segment beach area (between 1 m and 4 m elevation) varied between a loss of 26.5 m^2 and gain of 11.3 m^2 per m of segment length, with an average segment area loss of 0.4 m^2/m. Changes in segment volume varied between 75.1 m^3 erosion and 102.7 m^3 accretion per m of shoreline, with an average accretion of 4.8 m^3/m. As could be expected, rocky beaches were the most stable and sandy types of beaches the most variable (Fig. 5). Overall, considering the whole coastal stretch between 1 m and 4 m elevation (independent of segment areas which may be partially overlapping or not, given the straight, perpendicular beach delimitation), data show an increase of 5.9% in 3D area and of 6.4% in volume. This shows that, on average and unexpectedly, during the study period, the Vila Nova de Gaia coast gained in area and volume.

4. CONCLUSIONS

The GIS allowed analysis, comparison and mapping of the DEMs. The study area was objectively divided into beach segments, central segment beach profiles were obtained, and areas and volumes quantified, both per segment and for the whole study area. GIS results could subsequently be successfully exported and analysed using statistical software, to assess beach dynamics and relate it to wave and wind time series.

Acknowledgements

This research was partially supported by the Strategic Funding UID/Multi/04423/2013 through national funds provided by FCT – Foundation for Science and Technology and European Regional Development Fund (ERDF), in the framework of the programme PT2020. This article is a result of the project INNOVMAR - Innovation and Sustainability in the Management and Exploitation of Marine Resources (reference NORTE-01-0145-FEDER-000035, within Research Line ECOSERVICES), supported by North Portugal Regional Operational Programme (NORTE 2020), under the PORTUGAL 2020 Partnership Agreement, through the European Regional Development Fund (ERDF)".

REFERENCES

Bio, A., Bastos, L., Granja, H., Pinho, J.L.S., Gonçalves, J.A., Henriques, R., Madeira, S., Magalhães, A., and Rodrigues, D. (2015). Methods for coastal monitoring and erosion risk assessment: two portuguese case studies / Métodos de monitorização e análise de risco de erosão costeira: dois casos de estudo portugueses. *Journal of Integrated Coastal Management*, 15, 47-63.

Burrough, P.A., and McDonnell, R.A. (1998) *Principles of Geographic Information Systems*; Oxford Science Publications, New York, USA, 356 pp.

Ciavola, P., Ferreira, O., Haerens, P., Van Koningsveld, M., and Armaroli, C. (2011). Storm impacts along European coastlines. Part 1: the joint effort of the MICORE and ConHaz projects. *Environmental Science & Policy*, 14, 912-923.

Douglas, D. and Peucker, T. (1973). Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *The Canadian Cartographer*, 10, 112-122.

Forbes, D.L., Parkes, G.S., Manson, G.K., and Ketch, L.A. (2004) Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. *Marine Geology*, 210, 169-204.

Gonçalves, J., Bastos, L., Pinho, J., and Granja, H. (2011). *Digital aerial photography to monitor changes in coastal areas based on direct georeferencing*. 5th EARSeL Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone, Prague, Czech Republic. URL http://www.conferences.earsel.org/abstract/show/2689.

Granja, H., and Pinho, J.L. (2014). A multi-criteria approach for erosion risk assessment using a new concept of spatial unit analysis, wave model and high resolution DEMs. *In:* Charles, J., Finkl, W., and Makowski, C. (eds.), *Advances in Coastal and Marine Resources: Remote Sensing and Modeling*. Coastal Research Library 9, Springer, USA, 481-494.

Jacobsen, K. (2000). User Manual Program System BLUH. Institute for Photogrammetry and Engineering Surveys, University of Hannover, 444pp. URL http://www.ipi.unihannover.de/kj.html?&L=1

Jiménez, J.A., Gracia, V., Valdemoro, H.I., Mendoza, T., and Sánchez-Arcilla, A. (2011). Managing erosion-induced problems in NW Mediterranean urban beaches. *Ocean & Coastal Management*, 54, 907-918.

R Development Core Team (2010). *R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL http://www.R-project.org/.

Rieke-Zapp, D.H., and Nearing, M.A. (2005). Digital Close Range Photogrammetry for Measurement of Soil Erosion. *The Photogrammetric Record*, 20, 69-87.

Using surfcams online streaming images for nearshore hydrodynamic characterization

U. Andriolo (1), E. Sánchez-García (2) and R. Taborda (1)

(1) Instituto Dom Luiz, Faculty of Sciences, University of Lisbon, Lisbon, Portugal. uandriolo@fc.ul.pt.

(2) Department of Cartographic Engineering, Geodesy and Photogrammetry, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain.

Abstract: Coastal imaging has been providing space and time high-resolution data to study coastal dynamics for the last 20 years. Yet, video monitoring systems implementation can be expensive in terms of installation and maintenance.
This work aims to investigate the use of surfcams for supporting the analysis of nearshore processes. Images were retrieved by online video burst of a surfcam installed at Costa of Caparica (Portuguese west coast). Photogrammetric techniques allowed converting grabbed frames to geo-rectified images.
The statistical analysis of derived timestack images supported the characterization of several nearshore features and the discrimination of shoaling, surf and swash zones. Spectral analysis of images across the nearshore zone also allowed to get useful insights on incident wave characteristics.

Key words: video-monitoring, photogrammetry, wave characterization, coastal zone, wave spectra.

1. INTRODUCTION

Monitoring coastal processes is crucial for understanding nearshore dynamics and forecasting coastal hazards. Among remote sensing techniques, coastal imaging has proved a useful tool for supporting coastal studies. Argus program has been implemented worldwide and applied in coastal monitoring for two decades (Holman and Stanley, 2007). Besides, the development of low-cost monitoring systems (e.g SIRENA, Nieto *et al.* 2010; Orasis www.vousdoukas.com/; Kosta System www.kostasystem.com/) allowed the use of coastal imaging to a wide group of users. Yet, the implementation of these systems is limited by the installation structure requirements and running expenses.

Surfcams (or beach webcams) are usually dedicated to provide visual information of beach and wave conditions. To authors knowledge, only two previous studies were conducted aiming at investigation the possibility of using surfcam infrastructure for coastal studies (Mole *et al.*, 2013; Bracs *et al.*, in press), in particular shoreline monitoring and incident wave characteristics.

This communication reports a pilot study to use a surfcam for coastal studies on Portuguese west coast. We present a method to rectify surfcam images and to characterize nearshore hydrodynamics by timestack images analysis.

2. STUDY AREA AND SURFCAM

Costa of Caparica is a coastal stretch located on southern bank of the Tagus river inlet. The wave climate is characterized by significant wave heights ranging from 0.5 m to 2.5 m, period from 5 to 15 seconds with higher frequencies and intensities coming from WSW and WNW. The tidal regime is semidiurnal with a maximum spring tide up to 3.8 m (Veloso-Gomes *et al.*, 2004).

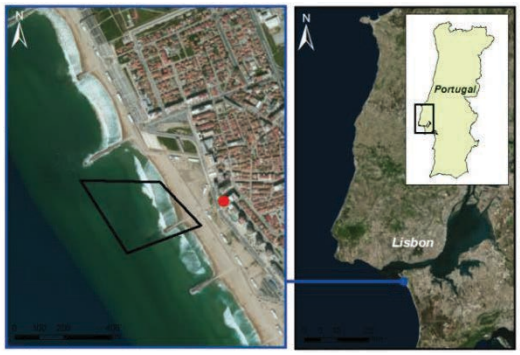


Fig. 1. Map of the study sites location. The black box identifies the monitored areaand the red dot the camera position (Base map source: ESRI imagery).

The Surfline network (http://www.surfline.com/surf-cams-and-reports/) includes 10 video cameras located along the Portuguese coasts. A single video-camera is installed at each beach site. For this experimental work, we considered the data acquired by the video-camera at Costa of Caparica (Fig. 1) between 10:00 and 10:10 a.m on 12th of November 2015.

3. METHODS

This section reports the methods 1) to rectify surfcam images; 2) to characterize the nearshore and discriminate wave transformation zones by timestack analysis and 3) to derive wave parameters by pixel time series.

3.1. Image rectification

Video was downloaded online and the frames were grabbed (Fig. 2) at a frequency of 1 Hz. (http://www.surfline.com/surf-report/costa-da-caparica-portugal_44509). The grabbed frames were rectified using a semi-automatic photogrammetric tool called *C-Pro* (Sánchez-García *et al.*, 2015).



Fig. 2. Example of frame grabbed over the acquired online video.

Firstly, Ground Control Points were collected by GPS-RTK in the field of view of the video camera. Through the use of such points, *C-Pro* algorithms achieved the preliminary camera repositioning process by Direct Linear Transformation. Successively, the pre-estimated camera position was refined by iterative collinearity adjustment. To optimize the procedure, *C-Pro* used the horizon's line in the image as geometric condition in the computation. Finally, image rectification was performed by converting pixel image coordinates to 3D world coordinates. We projected the images on the referenced plane identified by the 10-minutes-averaged sea level.

The accuracy achieved by *C-Pro* rectification process was checked comparing 38 points world coordinates with their rectified position on the image.

3.2. Timestack analysis and wave spectra

Timestack image was generated by sampling a cross-shore pixel array over rectified image sequences (Fig. 3). The image standard deviation described the average cross-shore pixel intensity variation (Almar *et al.*, 2012). From the analysis of the standard deviation profile, it was possible to segment the nearshore zone.

In coastal video remote sensing, time series of pixel brightness are proportional to the light reflected by the water surface. Pixel brightness time series can be considered a proxy of water level data collected by a wave gauge, as observed by several authors (e.g., Zikra *et al.*, 2012; Almar *et al.*, 2008). Therefore, incident wave characteristics were obtained from spectral analysis of timestack images.

The wave energy spectrum is the wave variance spectral density function *S(f)* at any frequency, defined as:

$$S(f) = \frac{1}{2df}|A_n|^2 \qquad (1)$$

where *df* is the frequency interval and A_n is called the amplitude spectrum:

$$A_n = 2|F_n| \qquad (2)$$

with F_n representing the complex frequency function derived by finite discrete Fourier transform of the water level time series (Kamphuis, 2010).

Given the relation:

$$F = 1/T \qquad (3)$$

where *F* is the frequency and *T* is the wave period, the peak period was estimated by the peak frequency of the wave spectrum. Wave spectra were calculated at cross-shore positions x = 100 (shoaling waves), x = 257 (first breaking point), x = 362 (last breaking point) and finally for the whole transect. The energies of the wave spectra were expressed in term of pixel brightness, therefore they were different in scale across the shoaling and breaking zones. In order to make spectra comparable, the brightness value at peak frequencies were used for normalization.

4. RESULTS

4.1. Image rectification

Fig. 3 shows the precision of *C-Pro* rectification process. Most of the checkpoints were within 1 m, value competent enough for the work to be performed. Maximal errors (~ 2.5 m) were found being the most distant points from the camera.

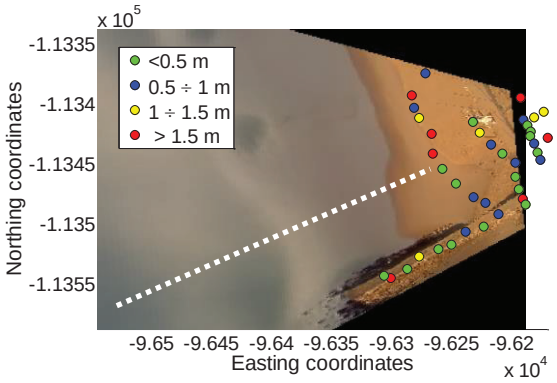


Fig.3. Rectified image and projecting error in meters for the checkpoint. White dotted line marks the cross-shore profile used for timestack production.

4.2. Timestack analysis and wave spectrum

Standard deviation profile of timestack image brightness shows a bimodal behavior (Fig. 4). The shape depends on the presence of two breaking points, typical of a barred beach.

Starting from offshore location (origin in x-axis in Fig. 4), in the shoaling zone, the standard deviation is almost constant. The first peak identifies the first breaking point, which can be related to offshore bar position (x = 257 m).

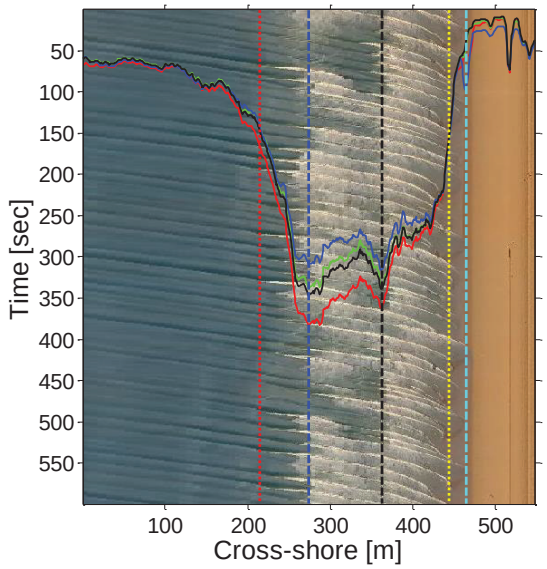


Fig. 4. Timestack image. Coloured profiles represent standard deviation of pixel brightness: red, blue and green the respective profile of color bands, black profile the standard deviation of grayscale image. Vertical lines limit nearshore areas: red line is the limit between shoaling (to the left) and breaking zone. Blue and black lines are first and last breaking point locations, respectively. Yellow vertical line defines the shoreline, cyan line the maximum run-up excursion. X axis origin is set offshore.

The second peak represents the onshore breaking point location (x = 362 m), from which all the waves have broken and dissipate till the upper swash limit. The point in which standard deviation reaches the minimum value defines the upper swash limit (x = 472 m).

The mean value of standard deviation between an offshore location, where signal is almost constant, and the first breaking point was found. The cross-shore position identified by this value is the boundary between shoaling zone and surf zone. Shoreline was identified where the mean value of standard deviation between by the location last peak position and wet-dry border was found. Therefore, shoaling zone, surf zone and swash zone were clearly indentified. Relating to Fig. 4, shoaling zone is the part to the left of red line, surf zone is bounded by red and black line, finally swash zone is the part between black and cyan line.

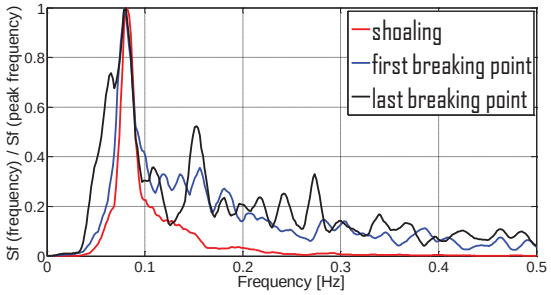


Fig. 5. Timestack-derived wave spectrums computed over different cross-shore positions.

Wave spectra (Fig. 5) show a peak around frequency = 0.08 Hz, which correspond to a wave period of 12.45 seconds. Multiple lower peaks that appear on wave spectrum of breaking points are characteristic of surf zone spectra in relation to nonlinear wave components (Herbers *et al.*, 2000).

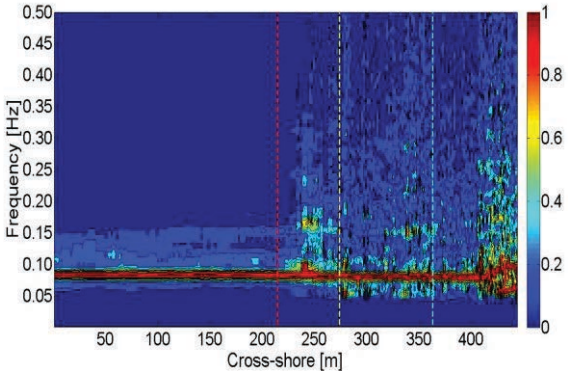


Fig. 6. Video-derived wave spectrum computed over the entire timestack. Vertical red line is the limit between shoaling (to the left) and surf zone. Vertical yellow and cyan lines identify wave offshore breaking point and shore breaking point.

Fig. 6 shows the entire image wave spectrum normalized at each cross-shore position. It is clear that at the shoaling zone the wave spectra is narrow and presents a clear peak. Within the surf zone the spectra shows a wider range of frequencies and multiple peaks.

5. CONCLUSIONS

This work presented the first results on the exploitation of data acquired by surf-cam online streaming images. Images were successful rectified despite the unknown camera parameters. Main nearshore features were clearly identified using simple descriptive statistics over timestack images and wave characteristics were successfully deduced from standard spectral analysis.

Future works will aim to improve the methods for deriving data from surfcams and for validating video-derived hydrodynamics results.

Acknowledgment

Umberto Andriolo was supported by the EARTHSYSTEM Doctorate Programme led by Institute Dom Luiz Associate Laboratory at the University of Lisbon (SFRH/BD/52558/2014).

Elena Sánchez-García is supported by the Spanish Ministry of Education, Culture and Sport grant (state program in I+D+i 2013–2016).

The authors gratefully acknowledge J.E. Pardo Pascual and A. A. Balaguer Beser for their support and contributions.

REFERENCES

Almar, R., Bonneton, P., Sénéchal, N., and Roelvink, J.A. (2008). Wave celerity from video imaging: a new method. *Proceeding of the 31th International Conference of Coastal*

Engineering. Hamburg, Germany, ASCE, 661-673.

Almar, R., Cienfuegos, R., Catalán, P.A., Michallet, H., Castelle, B., Bonneton, P. and Marieu, V. (2012). A new breaking wave height direct estimator from video imagery. *Coastal Engineering*, 61, 42-48.

Bracs, M.A., Turner, I.L., Splinter, K.D., Short, A.D., Lane, C., Davidson, M.A., Goodwin, I.D., Pritchard, T., Cameron, D. (2015). Evaluation of opportunistic shoreline monitoring capability utilizing existing "surfcam" infrastructure. *Journal of Coastal Research* (in press).

Herbers, T.H.C., Russnogle, N.R., Elgar, S. (2000). Spectral Energy Balance of Breaking Waves within the Surf Zone. *Journal of Physical Oceanography*, vol. 30, 11, p. 2723

Holman, R. and J. Stanley (2007). The history and technical capabilities of Argus. *Coastal Engineering*, 54, 477-491.

Kamphuis, J.W. (2010). Introduction to coastal engineering and management, World Scientific.

Mole, M.A., Mortlock, T.R.C., Turner, I.L., Goodwin, I.D., Splinter K.D., Short, A.D. (2013). Capitalizing on the surfcam phenomenon: a pilot study in regional-scale shoreline and inshore wave monitoring utilizing existing camera infrastructure. *Journal of Coastal Research: an international forum for the littoral sciences*, SI 65, pp. 1433 – 1438.

Nieto, M.A., Garau, B., Balle, S., Simarro, G., Zarruk, G.A., Ortiz, A., Tintoré, J., Álvarez-Ellacuría, A., Gómez-Pujol, L. (2010). An open source, low cost video-based coastal monitoring system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 1712-1719.

Sánchez-García, E., Pardo-Pascual, J.E., Balaguer-Beser, A., Almonacid-Caballer, J. (2015). Monitorización de espacios costeros mediante un sistema fotogramétrico: C-Pro. *XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección "Teledetección: Humedales y espacios protegidos"; Sevilla, España.* ISBN: 978-84-608-1726-0; pp. 281-284.

Zikra, M., Hashimoto, N., Yamashiro, M., Yokota, M., & Suzuki, K. (2012). Application of video images for monitoring coastal zone in Hasaki Beachs, Japan. *Coastal Engineering Proceedings, 1*(33).

Veloso-Gomes, F., Pinto, F. T. & Barbosa, J. P. (2004). Rehabilitation study of costal defense Works and artificial sand nourishment at Costa da Caparica, Portugal. *Proceedings of the 29th International Conference of Coastal Engineering*, pp. 3429-3440.

SICA-SIGPAS

Ana Nobre (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, nº 49 1249-093 Lisboa; ana.nobre@hidrografico.pt

Resumo: O projeto SICA-SIGPAS é um Sistema de Informação e Comunicação Automatizado (SICA) intitulado de Sistema de Informação Geográfica do Património e Servidões Militares (SIGPAS).
É um sistema que se dedica à gestão do universo de infraestruturas presentes em áreas de servidão militar e que visa auxiliar os seguintes procedimentos de apoio à decisão: referenciamento dos pedidos de licenciamento de projetos de edificação e manutenção de um registo histórico de pareceres emitidos pela Marinha.
O SICA-SIGPAS está disponível através de dois WEBSIG, um de edição e outro de consulta, requerendo estes a credenciação dos seus utilizadores.
Relativamente à administração do sistema, esta é da competência do Instituto Hidrográfico (IH) e da Direção de Infraestruturas (DI) da Marinha Portuguesa.
O principal objetivo da presente comunicação é uma breve descrição da evolução e recentes desenvolvimentos deste projeto, especificamente a capacidade da DI editar a componente geográfica e descritiva no WebSIG de edição.

Palavras-chave: Sistemas de informação geográfica, servidões militares, planeamento territorial.

1. INTRODUÇÃO

As servidões militares, segundo o artigo 1º da Lei n.º 2078, de 11 de Julho de 1955, são zonas confinantes a organizações ou instalações militares ou de interesse para a defesa nacional (de carácter permanente ou temporário).

No artigo 2º do mesmo diploma legal, as servidões militares têm como fim:

- Garantir a segurança das organizações ou instalações militares ou de interesse para a defesa nacional;
- Garantir a segurança das pessoas e dos bens nas zonas confinantes com certas organizações ou instalações militares ou de interesse para a defesa nacional;
- Permitir às forças armadas a execução das missões que lhes competem, no exercício da sua atividade normal ou dentro dos planos de operações militares;
- Manter o aspeto geral de determinadas zonas com particular interesse para a defesa do território nacional, procurando evitar o mais possível a denúncia de quaisquer organizações ou equipamentos militares nelas existentes.

Para além disso, esclarece que este tipo de servidão é constituída, modificada ou extinta, caso a caso, por Decreto-Lei, diploma que terá de observar o seguinte formalismo jurídico:

- Referendado pelo Ministro da Defesa Nacional;
- Aprovação em sede de Assembleia da República;
- Publicação em Diário da República.

Relativamente ao conteúdo de um diploma orientado para esta finalidade, a decisão de estabelecer uma servidão militar exige um pleno e formal esclarecimento das seguintes matérias (Félix, 2008):

- Delimitação geográfica;
- Trabalhos e actividades condicionados;
- Determinar a entidade competente para atribuir as licenças;
- Instruções sobre como proceder ao pedido de licenciamento;
- Descrição da documentação tida como necessária.

Compete à Marinha, e de modo concreto à Direção de Infraestruturas (DI), "assegurar a execução das atividades relativas à emissão de pareceres no âmbito do licenciamento de construções e de obras nas áreas abrangidas por servidões militares" (Decreto Regulamentar nº10/2015 de 31 de Julho de 2015, artigo 1, alínea g).

Até 2007, segundo Félix (2008), a avaliação dos pedidos de licenciamento e estudos prévios sobre construções e edificações nas áreas sujeitas a servidão militar recorria a uma rotina de análise assente em descrições geoespaciais emitidas em decretos-lei e por informação recebida em formato analógico, elementos cuja fiabilidade técnica (erros de representação geográfica, como é o caso de cópias com escalas distorcidas) condiciona a boa execução da mesma.

Com vista a melhorar o desempenho dos atos processuais de análise, entendeu-se como necessário

o desenvolvimento de um Sistema de Informação (SI) que servisse de ferramenta de apoio à gestão do Património da Marinha e respetivas servidões associadas.

No entanto, e tal como salienta Félix (2008), o desenvolvimento de SI no seio da Marinha apoia-se num conjunto de regras previstas em publicação própria e assenta numa série de órgãos reguladores que autorizam e acompanham o *ciclo de vida* dos SI. Em virtude de tal, os SI desenvolvidos - ou a desenvolver - são designados de Sistemas de Informação e Comunicação Automatizados (SICA).

Sucintamente, a necessidade de implementar o SIGPAS foi promovida pela DI que submeteu o pedido ao Grupo de Planeamento Estratégico de Sistemas de Informação (GPESI). Este grupo é constituído por representantes do Estado-Maior da Armada, pela Direção de Análise e Gestão de Informação (DAGI), pela Direção da Tecnologia de Informação e Comunicação – Comissão Eventual (DITIC-CE) e por órgãos centrais de Administração e Direção (OCAD).

Ao dar como findos os trabalhos preparatórios, o GPESI solicitou, ao Vice-chefe do Estado-maior da Armada (VCEMA), a aprovação da proposta de produção, desenvolvimento e implementação deste sistema.

Relativamente à implementação do SIGPAS, a responsabilidade coube ao IH (em virtude da reconhecida experiência em desenvolver este tipo de sistemas), em parceria com a DI.

2. REQUISITOS TÉCNICOS DO SIG

Este projeto recorre, atualmente, ao seguinte software:

- SIG ArcGIS for Desktop 10.3 ® (do fabricante ESRI®), capacitado com as seguintes aplicações:

  ArcMap (facilita a análise e produção de mapas);

  ArcCatalog (facilita o acesso e gestão dos dados);

  ArcToolbox (contém ferramentas para conversão e processamento de dados).

- ArcGIS Viewer for Flex® (do fabricante ESRI®), (implementação e manutenção do WEBSIG);
- Base de Dados (BD) Oracle;
- *Software* GEMA (edição de metadados).

A tabela I contém uma breve descrição do universo de dados (camadas temáticas, fonte e descrição) considerados relevantes para o projeto.

Tabela I. Dados incluídos no sistema.

Camadas Temáticas	Fonte	Descrição
Antenas e outros	Ortofotos, cartas militares e imagens satélite	Tipo de antena e unidade a que pertence.
Património	BD de cadastro (descritivo) cedida pela Estado-maior da Armada (EMA)	Imobiliário pertencente à Marinha (bens imóveis tais como faróis, edifícios, laboratórios, terrenos…).
Processos de servidão	Processos armazenados em formato de papel	Localização geográfica dos pedidos requeridos por proprietários que pretendam construir nos seus terrenos e que abranja (total ou parcialmente) uma servidão militar.
Estruturas Militares	Ortofotos, cartas militares e imagens satélite	Perímetro e área geográfica das estruturas militares da Marinha que se encontram protegidas por servidões militares.
Rádios Link	Ficheiro KML cedido pela DI	Nomes das ligações.
Servidões sinalização marítima	Decretos-lei	Área das servidões de sinalização marítima.
Servidões Militares	Decretos-lei	Área das servidões militares.
Áreas Protegidas	Atlas do Ambiente	Áreas protegidas de Portugal continental.
Freguesias	Direção Geral do Território	Freguesias de Portugal referentes ao ano de 2015.
Concelhos	Direção Geral do Território	Concelhos de Portugal referentes ao ano de 2015.
Linha de Costa	Instituto Hidrográfico	
Dados de base	Serviços de dados disponíveis na interface do ArcGIS Viwer for Flex® (do fabricante ESRI®)	

3. DESENVOLVIMENTOS RECENTES

Ao invés da maioria dos dados que compõem a BD do SIGPAS, a qual não exige uma adição frequente, os temas "Património" e "Processos de Servidão" são a exceção à regra.

O tema Património inclui, de facto, a totalidade dos bens imóveis pertencentes à Marinha, contendo um universo de, aproximadamente, 219 elementos, existindo, ainda, uma série de polígonos, e respetiva informação descritiva, que deverão ser objeto de inclusão no sistema.

Relativamente aos "Processos de Servidão", tema que inclui os vários pedidos de licenciamento registados adjacentes às áreas de servidão militar. Até ao presente momento, foram inseridos um total de 1470 elementos.

As referidas edições, as quais incluem o desenho do polígono e a inserção da respetiva componente descritiva, foram realizadas em dois momentos distintos:

- Edição da componente geográfica, ou seja, a inserção do polígono era realizada no IH;
- Inserção da componente descritiva (anteriormente realizada pela DI) e posterior envio ao IH para inclusão no sistema.

A morosidade que caracterizava este processo refletia-se no momento de decisão, tornando-a menos eficaz e eficiente. A solução encontrada foi a da DI editar, em simultâneo e diretamente no WEBSIG, ambas as componentes.

As várias camadas de informação produzidas são armazenadas em BD Oracle, disponibilizando-as ao público através de um WEBSIG gerado em ambiente ArcGIS Viewer for Flex® (do fabricante ESRI®),

Foram ainda geradas duas novas camadas editáveis, com as caraterísticas mencionadas na tabela II.

Tabela II. Dados de edição incluídos no sistema.

Camadas	Atributos (n.º de colunas)	Informação descritiva (atributos)
Editar - Património	89	Descrição, Morada, Localidade, Freguesia, Município, Distrito, Custo, Data, área do terreno
Editar - Processos de servidão	21	Requerente, data, pedido, lotes, resposta, observações, parecer favorável ou desfavorável

A figura 1 revela o WEBSIG com alguns polígonos editados pela DI e a respetiva informação descritiva.

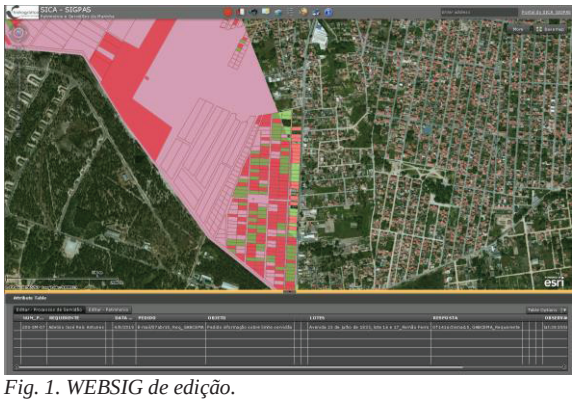


Fig. 1. WEBSIG de edição.

4. DIFUSÃO DO SISTEMA E EVOLUÇÕES

Os sistemas de informação militares podem ter várias classificações de segurança. Porém, o SIGPAS é identificado como um sistema "não classificado" mas entendido como "sensível" visto detalhar a localização do universo de estruturas terrestres da Marinha (Félix, 2008).

Assim, e uma vez que o sistema se encontra disponível na Internet, foi necessário atribuir credenciais de acesso aos seus utilizadores, cabendo aos colaboradores da DI a responsabilidade de editar a informação.

Deste modo, foram geradas dois WEBSIG:

- WEBSIG que, apenas, permite a consulta das camadas temáticas: http://gis.hidrografico.pt/flex/sigpas_consulta /



Fig. 2. WEBSIG de consulta.

- WEBSIG que permite a consulta de camadas e eventual edição: http://gis.hidrografico.pt/flex/sigpas



Fig. 3. WEBSIG de edição e consulta.

Sob a ótica do utilizador, foi entendido como relevante a elaboração de um portal eletrónico que facilite apresentar o projeto ao público, para além de disponibilizar outro tipo de informação, como é o caso dos metadados, legislação relacionada com servidões militares e contactos dos vários intervenientes.



Fig. 4. Portal do SICA-SIGPAS.

5. CONCLUSÕES

Três principais conclusões podem ser retiradas:

- A disponibilização ao público do WEBSIG SICA-SIGPAS acelerou a emissão de pareceres sobre pedidos de licenciamento nas proximidades das áreas de servidões militares.
- A inovação gerada pela introdução da BD Oracle e WEBSIG, que permitem a edição do património e historial de pareceres emitidos pela Marinha, por parte dos intervenientes da DI, agiliza a metodologia de trabalho utilizada e diminui o tempo de resposta no processo de tomada de decisão.
- O sistema desenvolvido apresenta várias funcionalidades que o tornam uma importante ferramenta, o que permite centralizar a informação geográfica utilizada e a documentação relacionada com as áreas de servidão militar.

REFERÊNCIAS

Decreto Regulamentar nº10/2015 de 31 de Julho de 2015, DR I Série.

Lei nº 2078 de 11 de Julho de 1955, DR I Série.

Félix, Inês (2008). SIGPAS - Sistema de Informação Geográfica do Património e Servidões Militares. Lisboa: Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação da Universidade Nova de Lisboa, 1 – 44.

Recuperação dos registos de reflexão sísmica - modo analógico para o digital com a máquina fotográfica

R. Melo (1), R. Santos (1) e A. Rodrigues (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa; anaraquel.melo@hidrografico.pt.

Resumo: O Instituto Hidrográfico (IH) é detentor de milhares de quilómetros de linhas de reflexão sísmica em suporte de papel. Neste sentido e de modo a não perder esta informação, foi implementado e testado um procedimento para a recuperação destes registos, que consiste na conversão dos perfis de reflexão sísmica, adquiridos em suporte de papel, para formato digital e posterior organização.
Este trabalho pretende descrever o processo de recuperação que consiste na digitalização de cada perfil através de várias fotografias obtidas com uma máquina fotográfica digital e na criação de um mosaico com todas as fotografias, de forma a reconstruir o perfil no formato *raster*. A conversão deste *raster* com o perfil para o formato *SEG-Y* é realizada através de uma aplicação específica. O processo descrito foi aplicado aos dados analógicos adquiridos na campanha SISPLAT VIII com êxito.

Palavras-chave: Dados analógicos, SISPLAT VIII, SEG-Y, raster, mosaico.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo de várias décadas, o Instituto Hidrográfico (IH) foi responsável pela aquisição e registo de milhares de quilómetros de linhas de reflexão sísmica em suporte de papel. Estes registos estão arquivados em compartimentos ao abrigo da luz e humidade. No entanto, vão-se deteriorando com o passar do tempo e, em caso de acidente, não existe nenhuma forma de os duplicar ou recuperar. Deste modo, e seguindo o procedimento inicialmente proposto por Badagola (2008), está a ser elaborado um procedimento para a recuperação dos registos de reflexão sísmica, em que o objetivo é criar ficheiros em formato SEG-Y - *Society of Exploration Geophysicists* para posterior reprocessamento com técnicas modernas de processamento de sinal e reinterpretação e que inclui a recuperação dos metadados e integração dessa informação num Sistema de Informação Geográfica (SIG). Este trabalho tem como principal objetivo descrever o processo de recuperação da informação histórica, através da rasterização dos perfis de reflexão sísmica em formato analógico e posterior conversão do *raster*, para o formato SEG-Y. O processo foi aplicado à recuperação da campanha SISPLAT VIII, realizada em fevereiro/março de 1999, a bordo do navio NRP "Almeida Carvalho", cobrindo a plataforma continental entre o cabo Carvoeiro e o cabo Raso. O sinal sísmico foi registado em papel térmico com 51 cm de largura, através da impressora térmica EPC Mod. 9800. Esta impressora permitia a impressão de 4096 amostras por coluna e a digitalização a 6 bits.

2. PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DOS REGISTOS DE REFLEXÃO SÍSMICA

O esquema da Figura 1 ilustra a metodologia desenvolvida para converter os perfis de reflexão sísmica do formato analógico para o formato digital.

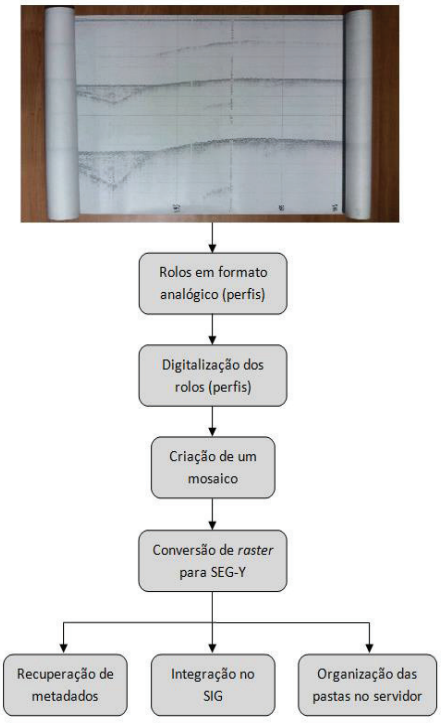


Fig. 1. Fluxograma do processo de recuperação dos registos de reflexão sísmica.

2.1. Parametrização da máquina fotográfica

Para a digitalização dos rolos foi necessário parametrizar a máquina fotográfica digital Nikon D800. Esta máquina foi escolhida por garantir a resolução geométrica e radiométrica dos perfis originais (Santos *et al.*, 2014). Para tal, foram

avaliados vários parâmetros como o tempo de exposição, a velocidade do obturador e a medida de sensibilidade do sensor à luz – ISO (*International Standards Organization*), de forma a alcançar a melhor qualidade possível das imagens ao nível da nitidez e da cor.

A velocidade do obturador controla a luz que chega ao sensor da máquina. Uma velocidade elevada corresponde a um tempo de exposição mais curto e proporciona um maior controlo da nitidez da imagem. Em relação à ISO, este parâmetro também permite controlar a nitidez da fotografia, uma vez que existe ima relação inversa entre o valor do ISO e a nitidez, para as mesmas condições de luz.

A parametrização que permitiu obter os melhores resultados sem alterações radiométricas, encontra-se na Tabela I, a qual não apresenta alteração dos valores de cinzento.

Tabela I. Parâmetros de configuração da máquina fotográfica (Nikon, 2011).

Tempo de exposição	Velocidade do obturador	Medida de sensibilidade do sensor à luz (ISO)
f5.6	1/125 sec	160

Paralelamente ao processo de parametrização da máquina fotográfica, realizado a uma determinada distância entre máquina fotográfica e a mesa onde se coloca a imagem a fotografar (Figura 2), foi também estudada a incidência da luz (através do ajuste da inclinação das duas fontes luminosas), de forma a garantir a homogeneidade da luminosidade na área fotografada. Procurou-se, desta forma, reduzir ao mínimo as alterações radiométricas (Santos *et. al*, 2014).

2.2. Digitalização dos rolos (perfís)

Para digitalizar o perfil analógico o rolo de papel é estendido em cima de uma mesa de vácuo (Figura 2), o que facilita o seu manuseamento e permite manter o papel do rolo esticado durante a aquisição das fotografias (processo de *rasterização)*.

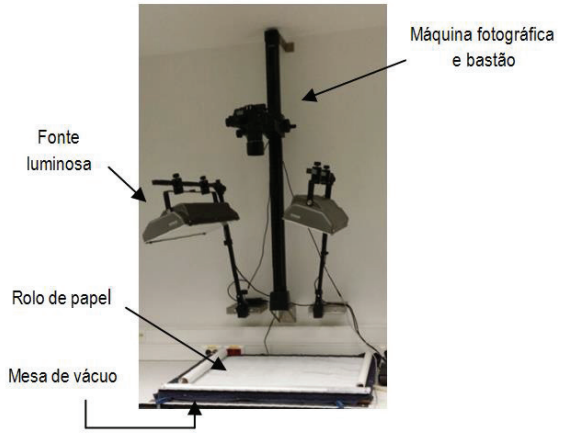


Fig. 2. Sistema de fotografia em funcionamento numa sala escura, com a máquina fotográfica montada no bastão e as fontes luminosas desligadas.

O alinhamento durante este processo é garantido por uma régua fixa à mesa de vácuo. A régua está alinhada com o sensor da máquina fotográfica para eliminar a acumulação de desvios ao longo do processo de rasterização.

Cada imagem *rasterizada* tem um comprimento de 38 cm e 25,5 de largura e tem 30% de sobreposição lateral, relativamente às imagens adjacentes do mesmo rolo; as imagens são gravadas no formato tif (*Tagged Image File Format)* sem compressão, dado que é um dos formatos aceites pela aplicação "*Image to SEG-Y*", da *Chesapeake Techonology, Inc*, e com uma resolução radiométrica de 8 bits por *pixel*, de forma a garantir a resolução radiométrica do sinal impresso no rolo (6 bits).

No rolo em papel, também está registada outra informação relevante, como os parâmetros de aquisição do sinal de reflexão sísmica, a escala vertical, o valor dos ganhos e as linhas de controlo do posicionamento das fiadas. Esta informação é fundamental por ser requerida no processo de conversão (descrito a seguir). Neste sentido, os perfis originais têm de ser subdivididos sempre que exista alterações nos parâmetros de aquisição.

Cada imagem deve ser corrigida da distorção radial, provocada pela geometria de aquisição da fotografia, e só depois deverá ser realizada a junção de todos os *raster* através da sobreposição existente entre as imagens contíguas.

2.3. Criação do mosaico

Nesta fase, foi necessário testar e analisar vários *softwares* de edição de imagem, de modo a testar as ferramentas e selecionar qual deles apresentava o melhor resultado. A maioria dos *softwares* permite a junção de imagens através do modo automático e manual. No entanto, após vários testes, constatou-se que a construção do mosaico, em modo automático, não seria viável, dada a elevada quantidade de amostras impressas e a minucia do resultado pretendido.

Apesar do método automático apresentar uma grande rapidez de processamento, a grande desvantagem consiste na falta de controlo na referenciação de pontos homólogos entre as duas imagens (na área de sobreposição). Por outro lado, desconhece-se também como é feito o "*blending*", pelo que a mistura ponderada entre duas imagens de iguais dimensões, na altura da junção pode implicar a alteração da verdadeira tonalidade da cor de cinzento do *pixel*. Este efeito provoca a modificação do sinal de reflexão sísmica na zona de sobreposição.

Face ao exposto, decidiu-se pela construção do mosaico em modo manual, pois, embora seja um método mais moroso, o resultado é claramente mais fidedigno, e a união das imagens (realizada aos

pares), é totalmente controlada pelo utilizador (Figura 3).

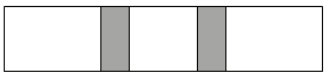


Fig. 3. Criação do mosaico pelo modo manual. A área a cinzento corresponde à zona de sobreposição.

O *software* escolhido, como o mais intuitivo e direcionado para este tipo de trabalho rigoroso e pormenorizado, foi o software livre *GIMP* versão 2.8.14 através da ferramenta "*Merge Visible Layers*".

Aplicando esta metodologia à campanha SISPLAT VIII, foram convertidas 44 fiadas, em que o número mínimo e máximo de *raster* utilizadas para a criação do mosaico variou entre 1 e 46, respetivamente (Tabela II).

Tabela II. Percentagem do número de imagens rasterizadas.

Nº de imagens rasterizadas	**%**
1	30
3 e 8	9
2	7
5, 12, 15 e 19	5
7, 11, 14, 17, 20, 21, 25, 26, 27, 28, 29 e 46	2

A figura 4 mostra, como exemplo, o produto final desta fase.

2.4. Conversão de raster para SEG-Y (vetorial)

Nesta fase, o perfil criado no passo anterior em formato *raster* é convertido para formato *SEG-Y*.

A conversão é realizada pelo *software* "Image to SEG-Y" da *Chesapeake Techonology, Inc*. Este software importa a imagem em formato tif do perfil de reflexão sísmica e o ficheiro de navegação no formato ASCII com as coordenadas geográficas (relativas ao datum WGS84) de um conjunto de posições, marcadas ao longo do perfil sísmico. Estas posições são conhecidas como foras. Estes ficheiros foram previamente recuperados (ver Santos *et al.*, 2014). Além desta informação, é necessário ainda: 1) parametrizar as unidades com que a profundidade vai ser medida, (neste caso será milissegundos (ms) de tempo duplo); 2) definir a área de conversão da imagem, indicando com o cursor os limites à esquerda, direita, em cima e em baixo e, 3) inserir a informação referente à hora de início e fim da linha. Após a inserção destes parâmetros e de atribuídas as coordenadas aos "*foras*" o ficheiro SEG-Y é gerado através do comando "*Save As SEG-Y*" (Figura 5).

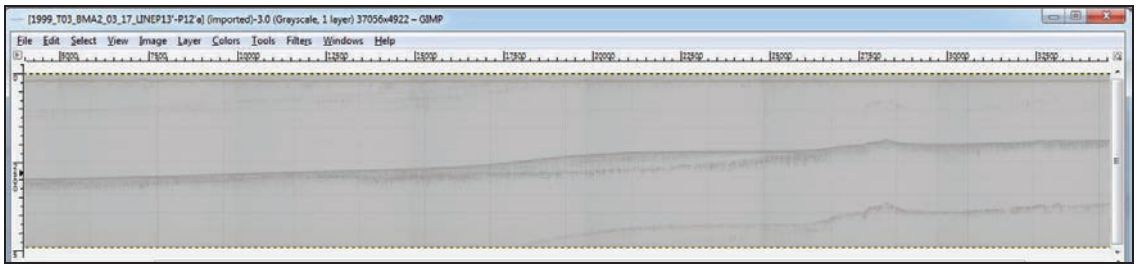


Fig. 4. Mosaico com sete imagens rasterizadas no software GIMP 2.8.

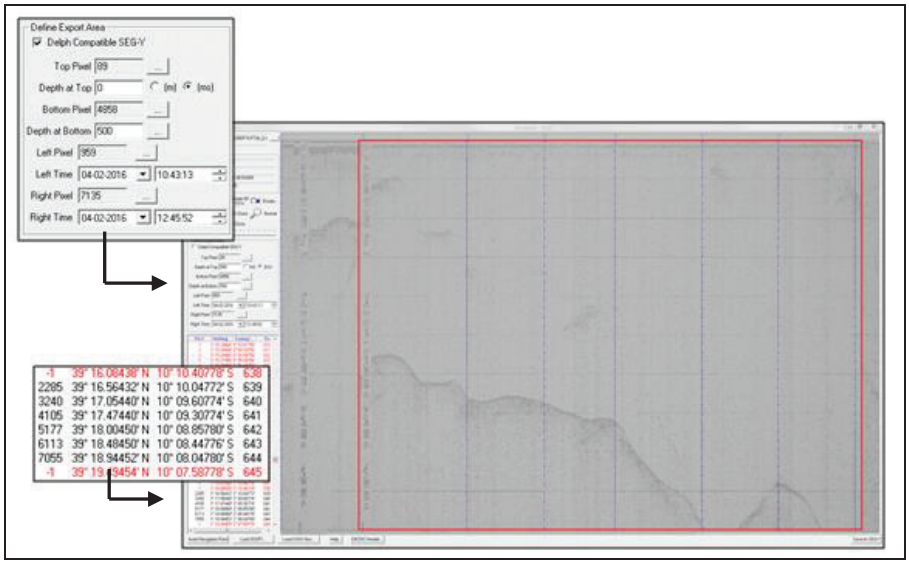


Fig. 5. Georreferenciação dos "foras" e parametrização da fiada de reflexão sísmica.

Esta aplicação converte a imagem em formato tif para *o formato SEG-Y* e, por meio de uma interpolação com base nos "*foras*" (posições com coordenadas conhecidas), georreferencia os outros traços do sinal.

Em algumas fiadas, foram detetadas algumas interferências do sinal, que podem ter sido provocadas por diversos fatores, na altura da aquisição da informação, tais como, alteração dos hidrofones, da parametrização entre outros. Na

altura de delimitar a área de conversão, estes casos foram ponderados e, dependendo da situação e da localização dos mesmos na fiada, foram ou não incluídos nesta área.

A aplicação *Delph Seismic Interpretation*, permite a visualização do ficheiro SEG-Y (Figura 6) e a verificação da qualidade do sinal obtido após a conversão.

É de referir que a aplicação "*Image to SEG-Y*" permite inserir informação da campanha, bem como os equipamentos utilizados e das fiadas através de um ficheiro em formato ASCII (*American National Standard Code for Information Interchange*) com cabeçalho EBCDIC (*Extended Binary Coded Decimal Interchange Code*) (Barry *et al.*, 1975). Este ficheiro está limitado a uma extensão de 3200 bytes, pelo que a informação a inserir, referente à fiada de reflexão sísmica, tem de ser muito objetiva e bem selecionada. Deste modo, o ficheiro SEG-Y gerado tem a informação necessária para prosseguir para o processamento do sinal. Esta fase não foi testada na campanha a recuperar (SISPLAT VIII), tendo a informação sido inserida na aplicação *SeiSee*, utilizada pelo *software* de aquisição e processamento utilizado nos levantamentos recentes realizados pelo IH.

2.5. Organização das pastas no servidor

A estrutura foi criada de acordo com as fases do trabalho, tendo assim sido criadas três pastas: uma para os dados brutos, outra para os dados processados e, por fim, outra para os ficheiros em formato SEG-Y.

No que respeita ao nome dos ficheiros, para cada uma das fases, foi também criada uma nomenclatura.

3. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Os dados analógicos adquiridos na campanha SISPLAT VIII foram os primeiros a ser recuperados por esta metodologia, tendo sido obtidos bons resultados. Este facto tem sido comprovado por visualização entre o sinal existente no rolo e o ficheiro SEG-Y. Assim, vem mostrar que, com o procedimento implementado, é possível a recuperação dos perfis de reflexão sísmica em formato analógico, obtendo informação fiável e de uma forma pouco dispendiosa.

É de realçar que o procedimento, que tem sido implementado até à presente data, não está ainda fechado, sendo possível ir introduzindo alterações tendo em vista a obtenção de melhores resultados e a correção de eventuais problemas registados nos dados analógicos. Adicionalmente, continuará a exploração de outras ferramentas que permitam otimizar e tornar mais célere o processo de recuperação de dados analógicos e a sua conversão em dados digitais com interesse para a caraterização ambiental.

A recuperação dos metadados será a próxima fase deste projeto, estando prevista a divisão da informação por três tabelas distintas: campanhas, equipamentos e fiadas. Estas tabelas, depois de devidamente preenchidas, serão transferidas para o Centro de Dados Técnico Científicos do IH para integração futura na base de dados técnico-científicos do ambiente marinho.

Este processo de recuperação de perfis de reflexão sísmica termina com a integração da informação num Sistema de Informação Geográfica (SIG), que permita uma visualização rápida e consulta pelos utilizadores deste tipo de informação.

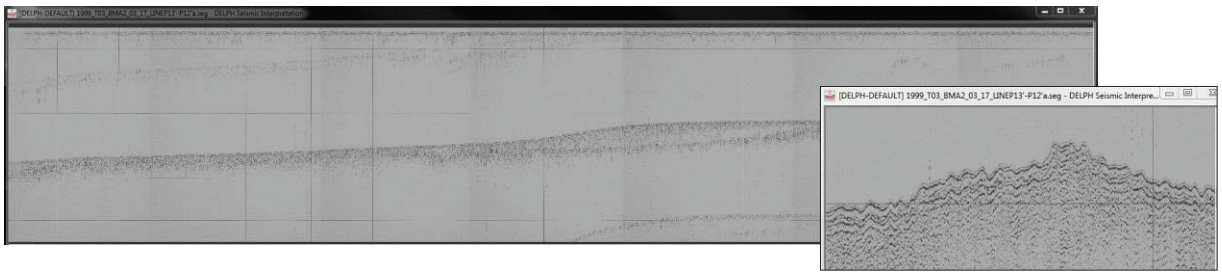


Fig. 6. Ficheiro em formato SEG-Y.

REFERÊNCIAS

Badagola, A. (2008). Recuperação de registos de reflexão sísmica – Do papel ao digital. Instituto Hidrográfico.

Barry, K.M., Cavers, D.A. e Kneale, C.W. (1975). Recommended standards for digital tape formats. Geophysics, 40, no. 02, 344-352.

Santos, R., Rosa, L., Ferreira, F. e Reis, L. (2014). Processo de recuperação da informação histórica de perfis de reflexão sísmica: Conversão da informação em papel para o formato digital. 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica.

Nikon (2011). *User's Manual Digital Camera D800 D800E*.

SIMOcean: Maritime Open Data and Services Platform for Portuguese Institutions

N. Almeida (1), N. Grosso (1), N. Catarino (1), R. Deus (2), L. Lamas (3), M. Alves (3), S. Almeida (3), P.B. Oliveira (2)

(1) DEIMOS Engenharia, Av. D. João II, Nº 41 10º, 1998-023 Lisboa; nuno.almeida@deimos.com.pt.

(2) Instututo Português do Mar e da Atmosfera.

(3) Instituto Hidrográfico.

Abstract: SIMOcean (System for Integrated Monitoring of the Ocean), co-funded by EEA Grants, aim to improve the Portuguese marine management, monitoring and vigilance capabilities, by aggregating different data, including specific human activities datasets (vessel traffic, fishing records, oil spills), and environment variables (waves, currents, wind). Those datasets, currently scattered among different departments of IPMA and IH, will be brought together to be exploited by three flagship value added services: 1) Fishing Areas Characterisation; 2) Sea State Index for Harbour Approaches; and 3) Support to Search and Rescue Missions.
SIMOcean will be based on open source web based GIS interoperable solutions, compliant with OGC and INSPIRE directive standards to support the evolution of a set of open interfaces and protocols in the development of a common European spatial data infrastructure.
The system will rely on Metadata Profile for the Sea developed by SNIM@R along with the European guidelines for Open Data systems.

Key words: Open data, marine data, marine services, metadata, INSPIRE, value added services.

1. INTRODUCTION

Portugal is the country with the largest exclusive economic zone (EEZ) in the European Union and the 10th largest in the world, at 3,877,408 km2, rendering the existence of an integrated management of Portuguese marine system crucial to monitor a wide range of interdependent domains. A system like this assimilates data and information from different thematic areas, ranging from ocean and atmosphere state variables to higher level datasets describing human activities and related environmental, social and economic impacts.

Currently, these datasets are collected by a wide number of public and private institutions with very diverse purposes (e.g., monitoring, research, recreation, vigilance) leading to dataset duplication, inexistence of common data and metadata standards across organizations, and the propagation of closed information systems with different implementation solutions. This lack of coordination and visibility hinders the marine management, monitoring and vigilance capabilities, not only by making it more difficult to access, or even be aware of, the existence of certain datasets, but also by minimizing the ability to create added value products or services through dataset integration from different sources. Adopting Open Data approach will bring significant benefits by reducing the cost of information exchange and data integration, promoting the extensive use of this data.

2. SIMOCEAN PLATFORM

SIMOcean system platform is designed to be a flexible framework able to communicate with the different information systems currently used by the Portuguese Institute for the Sea and Atmosphere (IPMA) [1] and Hydrographical Institute (IH) [2] to access their datasets or store any of the necessary datasets that are not yet integrated into those systems.

Its architecture provides full control to data and product providers to determine differentiated access permissions for each included dataset and be compatible with other information systems currently operational or under development at National or International levels (e.g. SNIMar [3], NIPIM@R, SNIG [4]).

The development of the software components will be based on open source solutions, compliant with Open Geospatial Consortium (OGC) standards [5] that derive from the SenSyF [6] framework, a geospatial data handling framework optimized for big data with cloud based processing capabilities, developed by DEIMOS Engenharia.

The figure below outlines the logical architecture of the system.

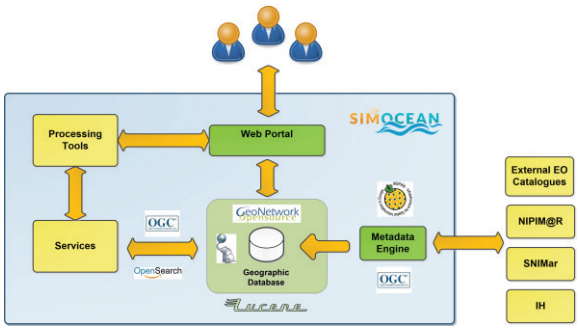


Fig. 1. SIMOcean Logical Architecture.

2.1. Catalogue

The SIMOcean catalogue component, responsible for assuring the integration all datasets, uses Elasticsearch [7] a search server based on Apache Solr [8] that provides a distributed, multitenant capable full text search engine with a REST interface and schema free JSON documents.

It provides a distributed OpenSearch interface with spatial, temporal, Earth Observation metadata search capabilities together with online access points with multiple access protocols. OGC OpenSearch provides a standard way of describing search engine capabilities so that they can be leveraged by search client applications.

The OGC OpenSearch Geo, Time and Earth Observation Extensions [9] available on the SIMOcean Framework adds a very simple way to configure OpenSearch for spatial and temporal queries over distributed repositories of contents having geographic and time properties, and for syndication of these search results in one large index.

The catalogue will contain metadata related to the different external data sources (e.g. NIPIM@R, SNIM@R, External EO Catalogues, IH, IPMA). The SIMOcean Metadata definition will follow the metadata profile from SNIM@R, which is already compliant with Geographical Information National System (SNIG) and INSPIRE.

The catalogue will accept external queries from authorized entities giving the capability to the runtime processors deployed within SIMOcean environment to query and retrieve the necessary products for their processing chain.

2.2. Web Portal

The SIMOcean system will integrate an online Visualization Platform with a Geographic Information System (GIS) like interface to perform:

- Basic data visualization (pan, zoom, get info for pixel or area in a table or plot format);
- Advanced data visualization - 2D plus time visualization capabilities; the ability to visualize several parameters at the same time using different visualization methods and visual representation options; visualization of data slices, according to spatial or temporal criteria);
- Perform basic data analysis (statistics, data queries).

The Visualization Platform Architecture will rely on the following components, further described below: Map API, Map Display Support Library and Server Backend.

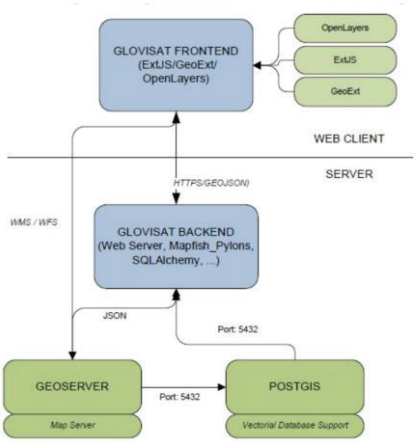


Fig. 2. Web Portal planned architecture.

2.3. Processing Tools

The processing tools component of SIMOcean will contain a set of transversal and interdependent high level geo-processing and visualization tools, namely:

- **Co-registration,** to assure that different spatial datasets are properly aligned, an essential function for overlay analysis;
- **Co-location,** to select and retrieve data from different datasets based on predefined spatiotemporal criteria;
- **Resampling,** to interpolate new cell values when transforming raster's to a new higher or lower cell size**;**
- **Re-gridding,** to match raster datasets to a common grid.

2.4. Services Integration

SIMOcean services shall be integrated within SenSyF, which provides a Cloud Computing environment to help the development and deployment of new services, requiring wide variety of data sources. Each service will be deployed in a Vitual Machine with scalable resources (memory, CPU, disk) and the execution can be triggered by the user through the Web Portal via OGC Web Processing Service (WPS) [10].

In case the service is very computing intensive and a single Virtual Machine is not able to handle the requests, it is possible to exploit the parallel processing capabilities of the platform based on HADOOP [11] Streaming, where existing algorithms and libraries can be integrated to

processing chains that can massively scale out on private or public Cloud infrastructures (e.g. Amazon Web Services).

3. VALUE ADDED SERVICES

In order to exploit all the data sources connected to SIMOcean, a set of Value Added Services detailed in the subsequent sections have been defined according to operational needs identified by IH and IPMA.

3.1. Fishing Areas Characterisation

This service will attempt to characterize fishing areas by finding relations between fish distributions and oceanographic features. To derive these relationships the SIMOcean platform will integrate several datasets, namely: surface currents from HF-Radar and circulation models (HYCOM [12], NEMO [13]); sea surface temperature (SST); thermal fronts derived from SST maps, surface wind (from ASCAT [14] A and B), and chlorophyll content from sensors such as MODIS [15] and VIIRS [16].

Those relationships are difficult to define because they depend on a number of factors, besides oceanographic, that are involved in behaviour of fish communities. Even if this relationship cannot be derived, the SIMOcean platform will still allow the user to visualize, in an integrated environment, information about those different physical sea habitat characterization parameters with possible interest to fishing activities.

This service can be valuable to the fish industry community, since it might allow better results with less finance resources, helping a better management of operations.

3.2. Sea State Index for Harbour Approaches

This service will attempt to provide a Sea State Index System for the management of maritime traffic through the combination of the wave model predictions with wind, cloud cover and precipitation forecasts for different Portuguese harbour areas (Viana do Castelo, Povoa do Varzim, Aveiro and Figueira da Foz).

Correlation between the forecasted fields of those variables and the operation conditions will allow the creation of a semaphored picture for each site for the next two days. The SIMOcean platform will also provide an integrated visualization environment of all the different meteorological and sea-state variables that can influence maritime traffic in ports. This type of system can therefore be essential to support port authorities in taking the right decisions regarding harbour operations.

3.3. Support to Search and Rescue Missions

The main objective of this service is to provide an integrated web visualization environment of forecasts and observations of different sea state variables (e.g., ocean surface current speed and direction, significant wave height as well as ocean surface wind speed and direction, mean sea level pressure) over Atlantic Ocean coastline from Portugal mainland, coming from different models and in-situ datasets (e.g. HF-Radar, parametric buoys, HYCOM, WW3 [17] and SWAN [18]).

This solution will allow the direct visual comparison of results coming from the different sources so that users can identify areas of higher and lower forecast confidence or the overlay of different variables forecast to provide a full sea state characterization in the user's area of interest. This will provide institutional users such as the Maritime Authorities an instrument that can narrow down the area of deployment and increase efficiency to locate possible survivors.

4. OPEN DATA

In Portugal, geospatial data infrastructures have been developing since late 1990's with the implementation of the Geographical Information National System (SNIG) and other associated institutional portals for thematic areas such as Environment (Environment Digital Altas/ SNIAMB) and Water Resources (SNIRH). Those portals have undergone several technological improvements to comply with current standards and are currently still some of the main hubs of Portuguese geographical information.

In the last few years, these systems have been complemented with other initiatives, more focused in open data repositories (iGeo) or National strategically important areas, such as maritime management, monitoring and vigilance of marine data, where several integrated systems are being developed:

- NIPIM@R
- SNIM@R

SIMOcean will use the same Metadata profile as SNIM@R along with the Collaborative Keywords [19]. This way the directives defined at a National level will be followed and the sharing of Metadata between systems will be ensured. The best practices suggested by the Open Data Goldbook for Data Managers and Data Holders [20] are being followed especially when it concerns to the Data Publishing topic.

5. CONCLUSIONS

The capability to anticipate the sea-state can prevent the loss of life and property. For instance, currently, wave models, such as the SWAN model, are used to propagate the conditions in the surrounding ocean and incorporate local wind fields and thus generate short term wave forecast.

The fitness of these models can be improved using satellite data and wave buoys. Furthermore, inter-

comparison of wave models can provide another tool to assess the fitness of the sea-state forecast. The problem arises when these different datasets (e.g., models, remote sensed and in-situ observations) are spread out through different institutions at diverse time and spatial scales, sometimes duplicated, in different data formats and integrated in closed geospatial data systems.

The development of single access point system for sea state data catalogue, visualization and processing for two of the main Portuguese sea data providers with significant operational responsibilities in marine management, monitoring and vigilance, will have an huge impact in the improvement of the National capacity in this area, improving significantly the quality of sea state forecast by optimizing cross validation procedures of model outputs.

This impact will be further amplified by: a) the full compatibility and complementarity with other larger scale marine National information systems currently being implement, such as SNIMar and NIPIM@R and; b) the integration of all processing functions in the SenSyF cloud based framework, able to optimize the scaling of computational resources and associated data production costs, adapting to user needs at any given time, in a flexible way. Furthermore, the integration with SenSyF, a framework originally developed for Sentinel data processing, assures an optimal assimilation of all derived ocean monitoring products from these reference satellite based datasets.

In this project the system will be tested and validated in set of operational use scenarios, using a set of broad scope sea state monitoring and forecast datasets and visualization and processing functions (co-location, resampling, regridding and co-registration). This initial setup and the modular and open system architecture favours the progressive inclusion and development of other higher level datasets and processing functions, during the project or after its conclusion, developed by in-house human resources of IPMA, IH or other sea related institutions, allowing for a long term sustainable growth of this service.

REFERENCES

1. IPMA Website: http://www.ipma.pt
2. IH Website: http://www.hidrografico.pt
3. SNIMar Website: http://snimar.pt
4. SNIG Website: http://snig.dgterritorio.pt
5. OGC Standards: http://www.opengeospatial.org/standards
6. SenSyF Overview: http://www.sensyf.eu/framework.html
7. Elasticsearch Website: https://www.elastic.co/products/elasticsearch
8. Apache Solr Website: http://lucene.apache.org/solr/
9. Opensearch Geo and Time Extensions: http://www.opengeospatial.org/standards/opensearchgeo
10. OGC WPS Standard: http://www.opengeospatial.org/standards/wps
11. Apache Hadoop Website: http://hadoop.apache.org
12. HYCOM Model Website: http://hycom.org
13. NEMO Modelling Framework: http://www.nemo-ocean.eu
14. ASCAT insrument information: http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Metop/MetopDesign/ASCAT/index.html
15. MODIS instrument information: http://modis.gsfc.nasa.gov/about/
16. VIIRS instrument information: http://npp.gsfc.nasa.gov/viirs.html
17. WW3 Model: http://polar.ncep.noaa.gov/waves/
18. SWAN Model: http://swanmodel.sourceforge.net
19. SNIMar Collaborative Keywords: http://collab-keywords.snimar.pt
20. Open Data Goldbook: http://www.europeandataportal.eu/en/content/goldbook/goldbook-welcome

Building an information system for managing quality multidisciplinary open access data on seamounts within Portuguese waters

Inês Farias (1), Guida Camacho (1), Aida Campos (1), Gabriel David (2), Miriam Tuaty Guerra (1), Victor Henriques (1), Alessandro Marraccini (1), Artur Rocha (2), Antonina dos Santos (1)

(1) Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I. P. (IPMA). ifarias@ipma.pt.

(2) Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC TEC).

Abstract: Open access to high quality data on marine ecosystems' structure and functioning is sparse, despite its utmost importance in driving new investments, new research and in promoting better advice and policy making. Physical, chemical, and biological data from the various components of marine ecosystems, as well as data on human disturbance over them, are extremely important.
SeaBioData (EEAGrants, PT02_Aviso5_0002) is a national project whose main objective is to design an information system for organising and storing multidisciplinary marine information. Biological and oceanographic data collected during eight surveys occurring under the BIOMETORE project (EEAGrants, PT02_Aviso2_0001) in seamounts within Portuguese waters, integrated in the Madeira-Tore and Great Meteor chains, and satellite data on human pressure will be included. The SeaBioData system will ensure the integration, organization and long-term preservation of all data relevant for marine information systems and will provide open access baseline information for management and sustainable use of the seamounts.

Key words: Marine, seamounts, information system, open access, multidisciplinary data.

1. INTRODUCTION

The deep-sea is Earth's final frontier for exploration, hence the conservation, management, and sustainable use of its resources are among the most critical and pressing ocean issues today (Clark *et al.*, 2006). Amongst the wide diversity of marine ecosystems, those associated with seamounts stand out for their importance for life in the oceans, supporting a diverse benthic and demersal fauna as well as many commercially targeted species (Clark *et al.*, 2006).

To improve the assessment and prediction of the environmental status in seamount chains located in Portuguese waters, namely the Madeira-Tore and the Great Meteor, a multidisciplinary team with members from two Portuguese institutions established the Portuguese Seamounts Biodiversity Data Management project (SeaBioData, EEAGrants, PT02_Aviso5_0002), which counts with Norway's Institute of Marine Research (IMR) as consultant.

SeaBioData's main objective is to design an information system for organising and storing multidisciplinary marine information (Figure 1).

1.1. Background

Seamounts are elevations of the seabed that appear in uneven densities in all ocean basins, usually of volcanic origin and conical shape, rising up to at least 100 m from the sea surface (Clark *et al.*, 2006; Pitcher *et al.*, 2007). In the last decades, following the collapse of many coastal fisheries, industrial fishing fleets spread around the oceans to these formerly inaccessible deep waters targeting the resident fish aggregations (Roberts, 2002). Deep water species, such as orange roughy, pelagic armourhead, blue ling, alfonsino, roundnose grenadier, and redfish, are being targeted by technologically developed deep water trawls, while other fisheries take advantage of the aggregation of pelagic species on top of the seamounts, such as tuna, billfish, and pelagic sharks (Pitcher *et al.*, 2007). On seamounts close to islands, semi artisanal fisheries may also develop and often target resident demersal fish species and invertebrates. Regular fishing activity is observed within a high number of seamounts on the Madeira-Tore and the Great Meteor chains, including Ampere, Josephine, Dacia, Canary, Bezymyannaya, Seine, Conception, Gettysburg, Endeavor, and Zvezda (Pitcher *et al.*, 2007). Seamount fisheries are particularly susceptible to fishing pressure mainly because many resident species are K-selected (long lived, late maturity, low fecundity) (Pitcher *et al.*, 2007). Therefore, it is of uttermost importance to improve the knowledge on seamounts' biological communities and geophysical processes for establishing and supporting conservation and management measures. In this context, the BIOMETORE project (Biodiversity in seamounts: the Madeira-Tore and Great Meteor, EEAGrants, PT02_Aviso2_0001) is addressing existing knowledge gaps, especially focused on biodiversity, and thoroughly studying the Madeira-Tore and the Great Meteor seamount chains. These chains are candidates to be designated as marine protected

areas (MPA) within the Portuguese implementation of the Marine Strategy Framework Directive (MSFD).

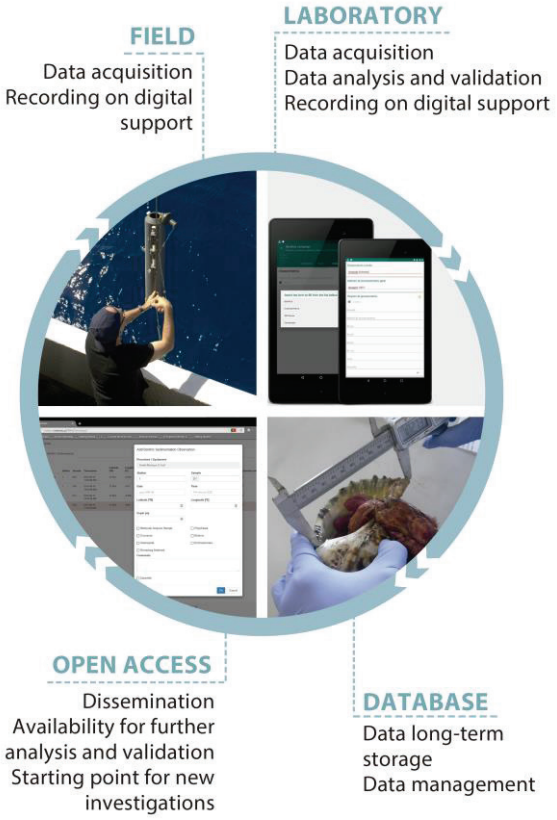


Fig. 1. SeaBioData's data life cycle.

1.2. Data acquisition

For characterizing these seamount chains, a high volume of data is being collected during a series of scientific surveys hosted by IPMA and its partner institutions. These surveys are covering seamounts included in the Madeira-Tore chain, namely Gorringe (Ormonde and Gettysburg), Josephine, Seine, Lion, and Unicorn, and in the Great Meteor chain, namely Pico Sul, Tyro, Irving, and Great Meteor. The collected data is highly heterogeneous and includes physical, chemical, and ecological information, related to both the pelagic and the benthic environments.

To improve data collection, a mobile application is being developed. LabTablet is designed to take advantage of the built-in sensors to quickly capture opportunity metadata. All the captured records are associated with established metadata standards, thus being able to export such resources to several data repositories with little effort. Besides handling metadata, LabTablet is also capable of importing data from several sources, from the researcher's personal computer, to cloud-based storage solutions. The implementation of this application relies on a developing platform, the SeaBioData system, that will help consolidate data management practices from early stages and thus promote a streamline research data handling.

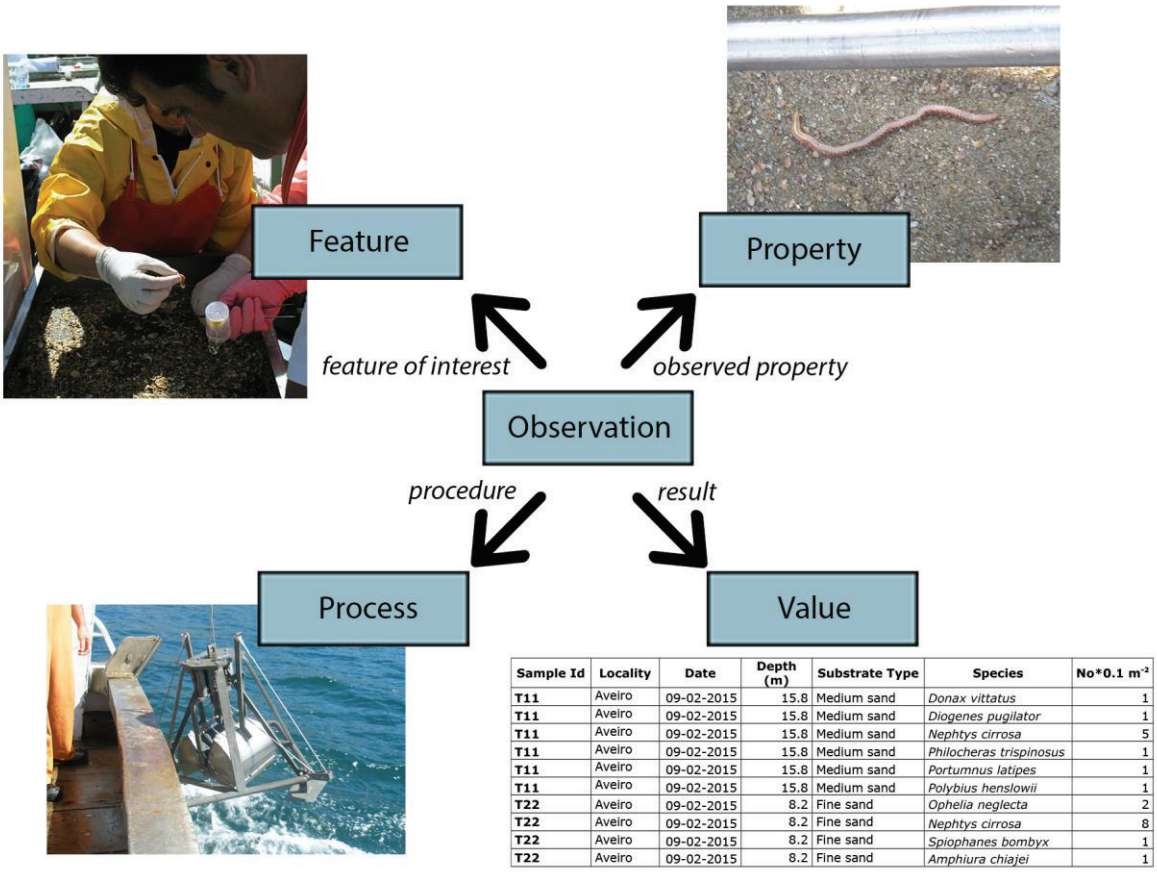
1.3. Data storage

The large diversity of data collected in survey campaigns to map and monitor marine areas is usually found spread throughout many locations (institutes, universities) and stored in different database systems. Moreover, data formats are typically heterogeneous, including video, text documents, proprietary binary formats, spreadsheets, among others. The SeaBioData system is an information system for organising and storing multidisciplinary marine information which will allow managing all those data in an integrated way. The system will be composed of two main interconnected subsystems and every data element will be georeferenced and time stamped. The first system is a repository of textual documents, scanned documents, spreadsheets, photographs, and videos, conveniently organized and searchable. The second system is a repository of data obtained with a large range of sampling instruments during the BIOMETORE surveys and exported as observation data sets. After each moment of data acquisition, researchers are able to create a submission package with LabTablet and send it over to the SeaBioData system for better handling.

The system's design will take into consideration the orientations from MoReq2010® (Modular Requirements for Records Systems) (EC, 2011) and will adopt standards to promote interoperability between information systems. For the definition of the metadata models it will follow the specifications from the European Commission's INSPIRE directive, which establishes an infrastructure for spatial information to support EU's environmental policies, and policies or activities that may have an impact on the environment (EC, 2007). This directive enables sharing environmental spatial information among public sector organisations and improving the public access to spatial information across Europe. Controlled vocabularies will assist in the definition of the encoding schemas for indexing metadata.

SeaBioData system's conceptual domain model for observation data (Figure 2) is in accordance with the Observations and Measurements (O&M) specification (Cox, 2013; Schleidt *et al.*, 2014), which can be summarised in the following steps:

1. Observation is the act of measuring the value of a property related to a feature, using a process. It associates the remaining concepts, but it also has specific attributes such as the property name, phenomenon time, valid time, or result quality. Observations may act as "Features of interest" to other observations. For example, a specimen from a benthic sample can be the subject of another observation.



Sample Id	Locality	Date	Depth (m)	Substrate Type	Species	No*0.1 m⁻²
T11	Aveiro	09-02-2015	15.8	Medium sand	*Donax vittatus*	1
T11	Aveiro	09-02-2015	15.8	Medium sand	*Diogenes pugilator*	1
T11	Aveiro	09-02-2015	15.8	Medium sand	*Nephtys cirrosa*	5
T11	Aveiro	09-02-2015	15.8	Medium sand	*Philocheras trispinosus*	1
T11	Aveiro	09-02-2015	15.8	Medium sand	*Portumnus latipes*	1
T11	Aveiro	09-02-2015	15.8	Medium sand	*Polybius henslowii*	1
T22	Aveiro	09-02-2015	8.2	Fine sand	*Ophelia neglecta*	2
T22	Aveiro	09-02-2015	8.2	Fine sand	*Nephtys cirrosa*	8
T22	Aveiro	09-02-2015	8.2	Fine sand	*Spiophanes bombyx*	1
T22	Aveiro	09-02-2015	8.2	Fine sand	*Amphiura chiajei*	1

Fig. 2. Example of SeaBioData system's O&M design pattern. Adapted from Schleidt et al. *(2014).*

2. *Process* is an abstraction of the "observation procedure", defined as a method, algorithm, or instrument, or as an arrangement of these, which may be used in making an observation. A sensor is a process, but so is the assessment of an expert (such as in the species identification) or a complex algorithm resulting from the processing of several inputs. When it is a sensor, a process can be directly described in Sensor Model Language (SensorML) (Botts, 2007), but its semantics are rich enough to describe other types of processes as well.
3. *Feature of interest* is an abstraction of a real world phenomenon. Some features are not directly observable, therefore there is the concept of sampling feature, which, for SeaBioData, can be a sediment or a water sample collected during a survey at a specific geographic location. Features fall under feature types, such as: species occurrence point, water column, trajectory, grid or water sample.
4. *Observed property* is a facet or attribute of an object referenced by a name along with its units and which can be designated as parameter or variable depending on the application domain. Examples of observed properties are: species, depth, salinity, water colour, nitrate concentration, etc.
5. *Result* is an estimate of the value of a property determined through a known process. Results have pre-defined types ranging from a single value to a multidimensional data set.

1.4. Dissemination

High quality data on marine ecosystems' structure and functioning is of utmost importance for driving new investments and new research and for promoting better advice and policy making. With the SeaBioData system, the route between data acquisition and dissemination will be highly optimized and data resulting from public-funded research will be securely stored and accessible in real time. These measures will also assure that studies can be replicated by other researchers,

following the 'European Code of Conduct for Research Integrity' (Anon., 2011).

2. FINAL CONSIDERATIONS

SeaBioData project will provide innovative and imperative tools for marine research and for the link between the scientific community and other stakeholders related with the marine environment, such as the public administration, the fishing industry, environmental managers, and the general public.

Ultimately, the SeaBioData system will ensure the data management, the long-term preservation, and the open access to high quality marine data, which are the baseline for marine information systems in general and for a sustainable management and use of seamounts in particular, as well as to improve the ability to assess and predict the environmental status in Portuguese marine waters.

Acknowledgements

This work has been funded by SeaBioData project (EEAGrants, PT02_Aviso5_0002). The authors are grateful to Inês M. Dias and Lígia F. de Sousa (IPMA) for the conceptualization and design of Figure 1 and to Ana Teresa Pereira (IPMA) for support with questions regarding BIOMETORE project (EEAGrants, PT02_Aviso2_0001). All images were collected within SeaBioData and BIOMETORE.

REFERENCES

Anon. (2011). *European Code of Conduct for Research Integrity.* European Science Foundation, Strasbourg, France, and ALLEA, Amsterdam, The Netherlands, 20 pp.

Botts, M. (ed.) (2007). *OpenGIS® Sensor Model Language (SensorML): Implementation Specification.* Version: 1.0.0. OGC® 07-000, Open Geospatial Consortium, Inc. 108 pp.

Clark, M.R., Tittensor, D., Rogers, A.D., Brewin, P., Schlacher, T., Rowden, A., Stocks, K., Consalvey, M. (2006). *Seamounts, deep-sea corals and fisheries: vulnerability of deep-sea corals to fishing on seamounts beyond areas of national jurisdiction.* UNEPWCMC, Cambridge, UK, 80 pp.

Cox, S. (2013). *Geographic Information – Observations & Measurements.* Tech. Rep. OGC and ISO 19156:2011(E), Open Geospatial Consortium. 46 pp.

EC (2007). Council Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). OJ L108/1.

EC (2011). MoReq2010, Modular Requirements for Records Systems – Core services & plug-in modules (version 1.1), DLM Forum Foundation. 524 pp.

Pitcher, T.J., Morato, T., Hart, P.J.B., Clark, M.R., Haggan, N., Santos, R.S. (2007). *Seamounts: ecology, conservation, and management.* Fish and Aquatic Resources Series, Blackwell Publishing, Oxford, UK, 497 pp.

Roberts, C.M. (2002). Deep impact: The rising toll of fishing in the deep sea. *Trends in Ecology and Evolution* 17(5): 242-245.

Schleidt, K., Bulens, J., Cox, S., et al. (2014). *Guidelines for the use of Observations Measurements and Sensor Web Enablement related standards in INSPIRE: Annex II and III data specification development.* Tech. Rep. D2.9.v2.0, INSPIRE Cross Thematic Working Group on Observations & Measurements. 93 pp.

A produção de cartografia náutica a partir de um sistema de Base de Dados

I. Patriarca (1), P. Sanches (1), A. Moura (1), A. Manuel (1), J. Cardoso (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das trinas, nº 49 1249-093 Lisboa, isabel.silva@hidrografico.pt.

Resumo: A produção de cartografia náutica baseada em sistemas de gestão de base de dados espaciais iniciou-se há mais de uma década. No final de 2004 o Instituto Hidrográfico optou pelo sistema CARIS-HPD em ambiente ORACLE, no sentido de tirar partido das vantagens que um sistema de base de dados proporciona, tendo sido um dos pioneiros na adoção desta solução. Após um período inicial de implementação seguiu-se a fase de produção de carta náutica e de carta eletrónica de navegação. Até à data foram produzidas cartas do fólio nacional – Portugal continental e arquipélagos dos Açores e da Madeira – e prevê-se estender a produção com este sistema às cartas portuárias do fólio de Cabo Verde. Este artigo pretende descrever a metodologia adotada pelo IH na implementação do CARIS - HPD.

Palavras-chave: CARIS – HPD, base de dados cartográfica, cartografia, produção cartográfica, ORACLE.

1. INTRODUÇÃO

O Instituto Hidrográfico (IH), no âmbito das suas atribuições, é responsável pela execução e divulgação da cobertura cartográfica das águas interiores e territoriais de interesse nacional e internacional, sendo a produção das Cartas Eletrónicas de Navegação (CEN) e das Cartas Náuticas (CN) efetuada pela Divisão de Hidrografia (HI).

O aumento do volume de dados, a importância e crescente uso das CEN, a necessidade da produção simultânea de CEN e CN, assim como o aparecimento de *software* de produção assente em base de dados geoespaciais, levou a que o IH adquirisse em 2004 um novo sistema: o CARIS *Hydrographic Production Database* (CARIS-HPD), (Caris, 2016), tornando-se num dos pioneiros a adotar este tipo de solução para a produção da sua cartografia oficial. Este sistema está vocacionado especificamente para a produção de cartografia náutica e encontra-se implementado com base numa arquitetura ORACLE. Deste modo, a produção de CN e CEN, bem como a gestão dos objetos geográficos e cartográficos, no processo de edição e atualização dos mesmos, beneficia das melhores vantagens que um sistema de gestão de base de dados (SGBD) geoespacial pode proporcionar. Em termos de produção cartográfica traduz-se num processo mais eficiente, com maior facilidade de manutenção promovendo uma melhor gestão dos recursos humanos (RH).

2. ENQUADRAMENTO

A produção de CEN e CN, assim como a sua atualização representa, para qualquer estado, um passo decisivo e importante para o aumento da segurança marítima.

Neste sentido, pretende-se ter um SGBD integrado que garanta a produção de CEN e CN a partir do mesmo conjunto de dados georreferenciados fonte, proporcionando desta forma uma maior eficiência desde o processo de carregamento da informação, sua manutenção, atualização e validação até à execução dos produtos cartográficos finais.

O processo de implementação tem sido moroso, condicionado por vários fatores como a instalação de *software*, formação de RH e o estabelecimento de critérios para o carregamento, validação e *output* da informação. Estes critérios em conjunto com o cumprimento das normas e especificações nacionais e internacionais na apresentação dos dados, com a própria arquitetura do sistema CARIS - HPD e tendo por base a informação cartográfica já existente, quer das CN quer das CEN, lançaram alguns desafios na estratégia de carregamento da informação e gestão da base de dados.

3. O SISTEMA CARIS - HPD

O sistema é composto por uma única BD "Fonte" designada por *Source Database*, que contém todos os dados georreferenciados a serem representados nas CEN e CN e por uma BD de "Produtos" designada por *Product Database*, conforme ilustra a Fig. 1.

O modelo de dados de toda a informação da BD "Fonte" está estabelecido segundo a norma S-57 (IHO, 2000), usada nos produtos vetoriais.

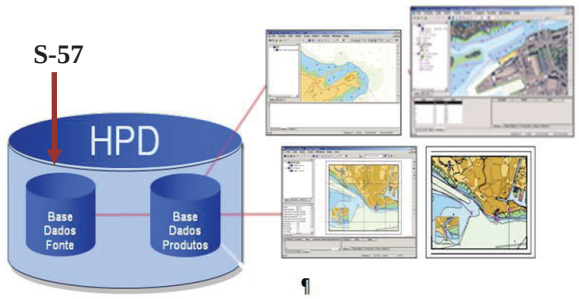


Fig. 1. Arquitetura da Base de Dados HPD.

É de referir que é na BD "Fonte" que se encontram todos os dados georreferenciados que concorrem para satisfazer as necessidades de produção cartográfica da competência do IH, tanto CN como CEN. Para cada produto cartográfico existem objetos específicos, conformes com as especificações nacionais e/ou internacionais, que se encontram somente ao nível da BD dos "Produtos".

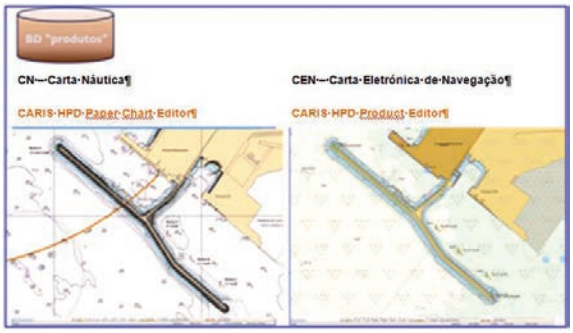


Fig. 2. BD dos "Produtos" do CARIS-HPD; CN, CEN e respetivos editores dos produtos.

O sistema de produção CARIS-HPD engloba genericamente os quatro processos ilustrados na Fig. 3, cujas atividades podem ser resumidas da seguinte forma:

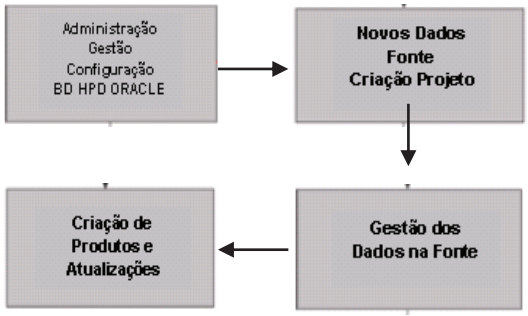


Fig. 3. Plataforma de trabalho na BD HPD.

Ao nível da gestão desta estrutura, uma das vantagens que apresenta, é que permite gerir a produção dos produtos cartográficos beneficiando da mais-valia de uma gestão por projetos, associada a todas as etapas do processo de produção.

Do ponto de vista da edição e gestão da informação, uma das vantagens que apresenta este SGBD é a não duplicação de objetos na BD "Fonte", sendo que cada objeto é armazenado uma só vez na BD, eliminando a redundância. Na BD dos "Produtos", O mesmo objeto pode assumir representações diferentes em conformidade com a escala de representação e o grau de generalização associado, consoante o seu propósito em termos de navegação. Outra grande vantagem deste sistema é permitir o acesso simultâneo de múltiplos utilizadores aos dados fonte para criação de diferentes tipos de produtos cartográficos, a partir de um mesmo conjunto de dados geoespaciais. Outro benefício do sistema CARIS – HPD, é permitir que todas as atualizações efetuadas nos dados fonte, se reflitam automaticamente nos produtos cartográficos já existentes e elaborados a partir dos dados origem assim que estes são atualizados na BD "Fonte". Essa atualização é feita ao nível dos editores dos produtos, através do HPD *Product Editor* para as CEN e por meio do HPD *Paper Chart Editor* para as CN, conforme evidencia a Fig. 2. Todas as atualizações e manutenção dos dados origem dos produtos em formato S-57, são introduzidas na BD "Fonte" do CARIS – HPD mediante a ferramenta HPD *Source Editor*. Todos os dados do *Source Database* e das CEN têm a sua informação representada em coordenadas geográficas e sem projeção, enquanto a informação representada nas CN já assume a projeção de Mercator.

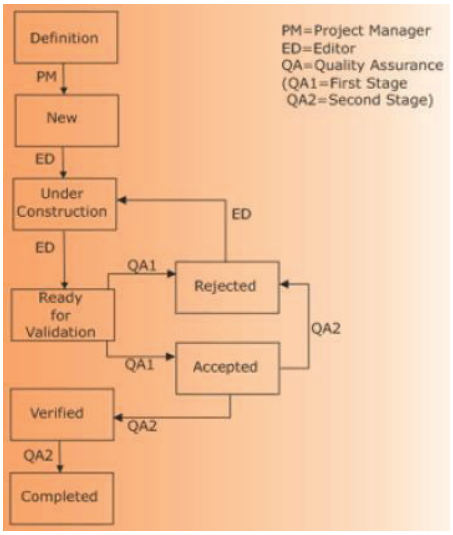


Fig. 4. Etapas de um projeto registadas pelo valor do seu Project Status (Caris, 2016).

As alterações e diferenças entre os dados origem e os produtos são facilmente identificadas pelo sistema e as devidas atualizações ao produto são rapidamente implementadas.

É ainda possível visualizar um histórico de atualizações ao longo do tempo para um dado objeto.

4. PROCESSO DE IMPLEMENTAÇÃO

4.1. Rede e servidores

A BD HPD foi estabelecida em ambiente ORACLE num servidor atribuído para receber esta arquitetura, podendo cada utilizador aceder remotamente através dos seus terminais (PC). Dentro da BD ORACLE foram considerados tantos setores quantas as áreas

geográficas contempladas no Fólio Cartográfico do IH. Estes setores criados no ORACLE são denominados por *Schemas* e no seu conjunto constituem a BD HPD no ORACLE. À data estão constituídos os *Schemas* para Portugal continental, Açores, Madeira, Angola, Cabo Verde e São Tomé.

4.2. Instalação software e configuração do sistema

Ao nível da instalação de *software* e configuração do sistema, existem três identidades com atribuições específicas que importa referir: o Servidor da BD, o Administrador e os Terminais individuais de cada utilizador. O servidor da BD HPD tem instalado um interface de *software* próprio para acesso ao ORACLE e aos *Schemas* estabelecidos. É por esta via que se iniciam as atualizações ao *software* com novas versões. Ao nível das Estações de trabalho na Divisão HI, estão instalados os interfaces de *software* para acesso tanto à BD "Fonte" como à BD dos "Produtos". Existe ainda na estação de trabalho "administrador", *software* de administração que permite a criação dos vários utilizadores dos dados, denominados *User's*, aos quais são atribuídas as permissões em função do seu papel no processo de produção cartográfica: compilador, revisor ou verificador da informação. Também na estação de trabalho "administrador" são criados os projetos associados aos conjuntos de dados de determinada área geográfica da BD "Fonte" a ser preparados para a BD dos "Produtos". Aos projetos criados são atribuídos os *Users* que vão trabalhar naquela área geográfica.

4.3. Critérios de carregamento de dados na BD "Fonte"

A estratégia inicial de carregamento da informação na BD "Fonte" foi considerar as CEN em vigor, por ser um produto codificado no formato de dados S-57. Para cada *Schema* foram criadas várias camadas de informação em função dos intervalos de escala de compilação conforme o tipo de navegação. Estas camadas são designadas por *Usage's*. Os vários objetos S-57 que compõem a CEN inicial de carregamento, são distribuídos pelos vários *Usage's* consoante determinados critérios.

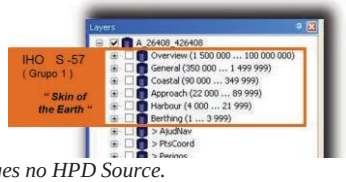


Fig. 5. Usages no HPD Source.

Um dos critérios usados na implementação do sistema e carregamento da informação foi a reorganização da informação em diferentes *Usage Bands* (UB) – Escalas de representação, em função dos diferentes tipos de navegação - uma vez que os intervalos de escalas das séries cartográficas das CN em papel e das CEN têm limites diferentes. Foi então necessário redefinir os intervalos das UB ao nível da BD "Fonte" para satisfazer os dois produtos cartográficos. As CN estão agrupadas por grupos de escalas podendo ser de escala Geral ou Roteamento, Costeira, Aproximação, Águas Restritas ou Portuárias. Os *Usage Bands* correspondentes a estes e utilizados nas CEN são os descritos na Fig. 6

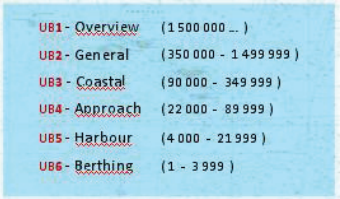


Fig. 6. Bandas de Utilização estabelecidas para as CEN.

Este conjunto de *Usages* foi designado por *Usages* Cartográficos e neles está contida toda a informação geográfica necessária e suficiente para gerar os respetivos produtos cartográficos. Toda esta informação foi carregada conforme o UB da CEN origem.

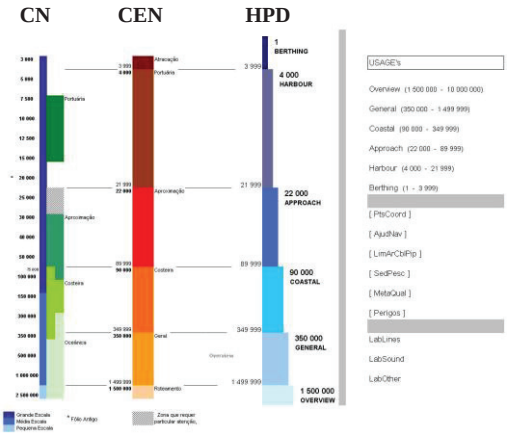


Fig. 7. Intervalos de escalas das CN e CN vs UB no HPD.

Além dos *Usages* Cartográficos ainda estão definidos outros *Usages* auxiliares denominados Genéricos, onde o critério usado não foi a escala mas sim um determinado tema para um conjunto de dados S-57. Assim existem os *Usages* das Ajudas à Navegação, dos Perigos, das Amostras de Fundo, das Áreas Restritas, dos Fundeadouros, etc. O objetivo prende-se com a eficiência das operações de atualização dos dados e nas *Query's* à BD HPD. Nos *Usages* Cartográficos, além de todos os outros objetos S-57, encontram-se também os objetos S-57 que correspondem ao "*Skin of The Earth*" – conjunto de objetos geográficos do tipo área que devem cobrir em adjacência toda a área geográfica de um futuro produto, não devendo nunca sobrepor-se entre si. São também denominados objetos do Grupo 1: áreas de intervalos de profundidades, áreas dragadas, pontões, áreas de terra, áreas não sondadas, docas flutuantes e navio desativado ou reconvertido e permanentemente atracado. Outro critério escolhido para o carregamento dos dados na BD "Fonte" foi adotar o fólio estabelecido para as CEN, tendo como prioridade de carregamento preencher primeiro os *Usages* correspondentes à maior escala, carregando

para a BD HPD as CEN portuárias e só em seguida UB Aproximação, Costeira e Geral.

4.4. Objetos S-57 e sua representação

No modelo de dados S-57, as entidades do mundo real são moduladas por um objeto característica, que contém a parte descritiva (nome e atributos) e ainda um objeto espacial (geometria): pontos, linhas, áreas ou sondas. No CARIS-HPD a representação dos dados é feita com recurso a bibliotecas de representação que são independentes desses mesmos dados. Na BD "Fonte" e nos produtos CEN a biblioteca é baseada na especificação S-52 (IHO, 2004). Nos produtos CN a representação tem por base as publicações 10Z01 - INT1 (IH, IHO, 2015) e S-4 (IHO, 2016).

4.5. Ficheiros de sistema

Estes ficheiros permitem construir integralmente tanto CN como CEN. A especificidade da cartografia náutica produzida pelo IH e no que diz respeito às CN, obrigou à alteração de alguns destes ficheiros originais. Foram modificados os ficheiros relacionados com a utilização de cores, símbolos, caixas de texto, sistemas de projeção (territórios de Portugal e Países Africanos Lusófonos), bem como os ficheiros que regulam o modo como a informação da BD "Fonte" é transposta para o editor de CN (tipos de letra, distâncias entre objetos, representação simbólica), visando harmonizar as CN produzidas pelo HPD com os *Outputs* dados pelo sistema anterior.

4.6. Validação dos dados para produção

Toda a informação fonte dos produtos, residente na BD "Fonte" da área geográfica em causa, deve ser revista em termos de atributos e representação dos objetos S-57, por um compilador/revisor diferente do primeiro, sendo que o processo de validação deve passar pelas seguintes fases e *Status*:

Objeto "*Under Construction*" → *Submit* → "*Not Verified*" → *Submit* →"*Rejected / Accepted*" → "*Verified*"

Só objetos com o estatuto *Verified* são visíveis para produção e podem ser integrados nos produtos cartográficos.

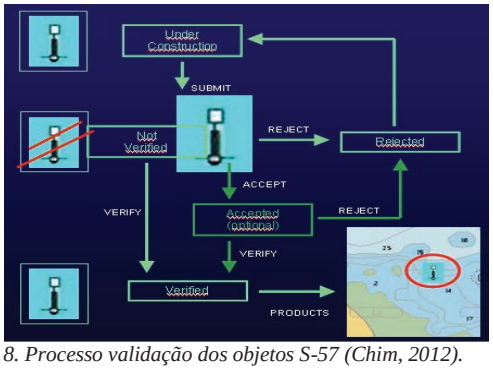


Fig. 8. Processo validação dos objetos S-57 (Chim, 2012).

5. A PRODUÇÃO. SITUAÇÃO FÓLIO

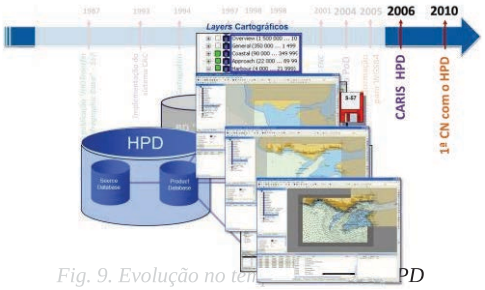


Fig. 9. Evolução no te… …PD

A primeira CN produzida com o sistema de BD CARIS – HPD foi em 2010, sendo que entre 2006 2009 o sistema esteve em fase de implementação na HI. Até à presente data, foram já produzidas com o HPD 26 CEN e 13 CN, sendo que 5 CN são de Portugal continental, 2 CN da Madeira e 6 CN dos Açores. O fólio de CN é composto num total de 74 CN sendo que cerca de 20% das CN do fólio foi produzido até ao presente com o sistema HPD.

6. CONSIDERAÇÃO FINAIS

O CARIS - HPD começou a ser utilizado no IH desde o início de 2005. Esteve numa fase experimental durante algum tempo e foi utilizado em simultâneo com outros softwares de produção cartográfica. Tornou-se a BD Cartográfica de produção do IH e a partir de 2009, começou a desempenhar plenamente o seu papel, passando a fazer parte integrante do processo de Produção Cartográfica.

REFERÊNCIAS

Artilheiro, F. (2015). Carta Eletrónica De Navegação – Os Novos Desafios. *Anais do Clube Militar Naval*, 683-689.

Caris (2016). *Caris HPD 3.1 User Guide*.

Chim, V. (2012). O S.I.G. na Cartografia Náutica – Base de Dados de Produção Cartográfica (BDPC). *I Colóquio de Sistemas de Informação Geográfica: Tendências*, SGL / Dezembro.

IHO (2000). *S-57 – Transfer Standard for Digital Hydrographic Data*. Edition 3.1

IHO (2010) *S-52 - Specifications for Chart Content and Display Aspects of ECDIS.* Edition 6.0

IH,IHO (2015).10Z01-*INT1 (Símbolos, Abreviaturas e Termos usados nas Cartas Náuticas)*. 3ª Ed.

IHO (2016). *S-4 (Regulations of the IHO for International (INT) Charts and Chart Specifications of the IHO).* Edition 4.6.0.

Vulnerabilidade à inundação da zona ribeirinha de Lisboa devido à subida do nível do mar como consequência das alterações climáticas

M. Sousa (1), C. Antunes (2) e C. Catita (2)

(1) Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa; fc45443@alunos.fc.u.pt.

(2) Instituto Dom Luiz – Universidade de Lisboa.

Resumo: São cada vez mais frequentes os registos de eventos extremos como consequência das alterações climáticas. A subida do NMM é um dos exemplos mais relevantes deste tipo de eventos. Devido à elevada inércia dos oceanos e ao aquecimento global, a subida do NMM continuará a ocorrer a um ritmo considerável, colocando as cidades costeiras em risco. Este estudo avalia a vulnerabilidade da zona ribeirinha da cidade de Lisboa a inundações provocadas pela subida do nível do mar, considerando a variedade da maré, a sobreelevação meteorológica e o efeito de *setup* das ondas e do vento. Usando dados do marégrafo de Lisboa e tomando como referência a subida do NMM em Cascais, pretende-se obter uma cartografia de vulnerabilidade de inundação considerando diferentes cenários para diferentes períodos de retorno e respetivo uso e ocupação do solo. Neste trabalho, ainda preliminar, são apresentadas as zonas mais vulneráveis às inundações extremas relativamente a níveis máximos de maré e a percentagens anuais de submersão.

Palavras-chave: nível médio do mar, sobreelevação meteorológica, cartografia de vulnerabilidade, marégrafo de Lisboa, zonas inundadas.

1. INTRODUÇÃO

As alterações climáticas e a ocorrência de eventos extremos que confirmam estas mesmas alterações são cada vez mais evidentes. Estes eventos irão ocorrer cada vez com maior frequência e maior intensidade (IPCC, 2013). A subida do nível médio do mar (NMM) é uma das consequências mais evidentes que está associado às alterações climáticas (IPCC, 2013). A subida do NMM é um fenómeno, que ao contrário de outros eventos, como chuvas intensas ou tornados, não tem consequências imediatas mas a médio e longo prazo, de forma permanente, e com consequências graves para as zonas costeiras de baixa elevação, caso não sejam tomadas medidas de prevenção e adaptação atempadas.

As áreas urbanas, de uma forma geral apresentam grande parte da população, tanto em Portugal, como na maior parte do mundo e, estão localizadas maioritariamente no litoral do país. Nestas zonas costeiras são também onde se encontram muitos dos serviços, equipamentos e infraestruturas que contribuem para o desenvolvimento económico, com peso significativo na economia nacional. A subida do NMM aumenta o risco de erosão costeira, de inundação e galgamento, com a consequente e potencial destruição dessas infraestruturas provocando elevados impactos económicos.

Todas estas alterações são já uma realidade em algumas partes do mundo e, em Portugal eventos como os que ocorreram nos invernos de 2010, 2013 e 2014 são cada vez mais frequentes e, consequentemente, com períodos de retorno mais pequenos (IPCC, 2013).

Atualmente, dispomos de uma quantidade significativa de meios tecnológicos que permitem a observação e registo da maior parte das alterações ambientais e climáticas, nomeadamente, variações do nível do mar e todos os fenómenos a ele associados. Deste modo é possível perceber a evolução destas alterações, possibilitando assim a previsão para apoio à tomada de decisão, de modo a prevenir maiores impactos para a população, infraestruturas e equipamentos essenciais para funcionamento destas áreas vulneráveis e, respetivo desenvolvimento económico e humano.

Neste contexto é de extrema importância a avaliação da vulnerabilidade das zonas costeiras, em especial, das zonas ribeirinhas de cidades como Lisboa, com forte exposição ao risco de subida do nível do mar.

Este trabalho parte da análise espacial de extremos de inundação sobre o modelo digital de superfície (MDS) com resolução de 1 m. O MDS resulta da integração de dados lidar com modelo digital terreste (MDT).

2. NÍVEL MÉDIO DO MAR E SOBREELEVAÇÃO METEOROLÓGICA

Atualmente, recorrendo aos dados disponíveis dos vários marégrafos da costa Portuguesa é possível monitorizar e determinar com precisão a variação do nível do mar, tanto ao nível da subida do NMM como ao nível dos fatores de forçamento meteorológico. Consequentemente, avaliar o

impacto destas variações sobre as cidades e populações mais expostas.

O aumento do NMM na costa portuguesa, segundo os estudos mais recentes (Antunes, 2011; Antunes, 2014) já ultrapassou a taxa verificada no final do século passado, de 2,1 mm/ano, podendo situar-se atualmente na ordem de 4 mm/ano. Esta variação corresponde a uma duplicação da taxa em 15 anos, o que a longo prazo poderá resultar em impactos significativos resultando em danos irreparáveis, como o desaparecimento de ilhas, o recuo significativo da linha de costa em zonas continentais e insulares, bem como, a inundação das zonas de reduzida elevação em cidades costeiras com as consequentes implicações de adaptação e recuo do tecido urbano.

Outro fator a ter em conta é a variabilidade do nível do mar, à parte da maré astronómica que é conhecida e regular, relativo a variações periódicas de curto, médio e longo período. Existem outros fatores de forçamento meteorológico que podem projetar o nível do mar para valores muito superiores à previsão da maré astronómica com consequências extremas (Taborda e Dias, 1992). Estas variações resultam de um forçamento atmosférico associado à passagem de sistemas depressionários e ventos fortes, que quando em conjugação provocada pela passagem de tempestades, resultam na sobre-elevação meteorológica (SM) do nível do mar, e ainda no efeito de *setup* do vento (efeito de empilhamento junto à margem).

Em zonas ribeirinhas e de baixa elevação todos estes fenómenos têm igualmente influência, embora com impactos distintos. Já os fenómenos de forçamento de ventos locais ou agitação marítima são mais atenuados nas águas interiores de zonas estuarinas devido à sua natural proteção; ainda assim, não estão completamente isentas destas condicionantes, uma vez que pode existir alguma agitação, embora ligeira, e *setup* de vento.

No caso especifico deste estudo, à parte da subida do NMM que acontece em todas as zonas marítimas sensivelmente de igual forma, sofre também influência de *setup* de vento vindo dos quadrantes sul, sendo necessários a sua consideração. Dada a ausência de estudos publicados para a zona ribeirinha de Lisboa, decidiu-se assumir valores pequenos de 15 a 20 cm de *setup* de vento baseado na perceção empírica.

3. METODOLOGIA

Neste trabalho, foram analisados os valores horários registados pelo marégrafo de Lisboa, com localização no Cais do Terreiro do Paço, entre os anos de 1973 e 2009, adquiridos pelo Instituto Hidrográfico. Neste período existem anos para os quais não há dados disponíveis, contudo foi possível fazer uma avaliação do regime de sobre-elevação meteorológicas, recorrendo à análise harmónica anual, através do método de ajustamento de mínimos quadrados (MMQ), aplicando a metodologia descrita em Antunes e Godinho (2011). Desta forma, obtiveram-se, através dos resíduos do ajustamento dos dados horários, os valores de SM ocorridos em cada ano. Com a análise de extremos das séries anuais de SM foram estimados os períodos de retorno da amplitude de eventos extremos de SM de acordo com a metodologia de Vieira *et al*. (2012).

Tomando como referência a maré astronómica de 2010, foi calculada uma curva de frequência do nível de maré baseado numa amostragem de alturas de maré de 3 minutos. A razão de se tomar 2010 como referência, prende-se com o fato de ter sido um ano de marés equinociais máximas, de forma a definir um cenário de maré máximo que se verifica a cada 4 a 5 anos (ciclos quatri-nodais) devido às variações dos parâmetros orbitais da Lua. Aos valores de altura de maré foi retirado o respetivo valor de referência do Zero Hidrográfico (ZH), de forma a obterem-se elevações do nível de maré relativas à referência geodésica vertical, o *Datum* de Cascais de 1938.

Posteriormente, tendo como fundamento os valores de projeção de subida do NMM (Antunes, 2011), foram calculados os percentis de submersão para os três períodos dos cenários em estudo, 2025, 2050 e 2100. Sobre estas curvas de referência das frequências de submersão do nível do mar projetado, são adicionados as SM para dois períodos de retorno, acrescidas ainda, de valores empíricos de *setup* local resultante do forçamento do vento.

Nas duas figuras que se seguem (Fig. 1 e Fig. 2) são apresentadas as percentagens de submersão, para cinco cenários relativos aos anos de 2050 e 2100. Em cada figura estão representados as percentagens de submersão para o valor de referência do NMM, para os períodos de retorno de SM considerados, com e sem influência de s*etup* local de vento.

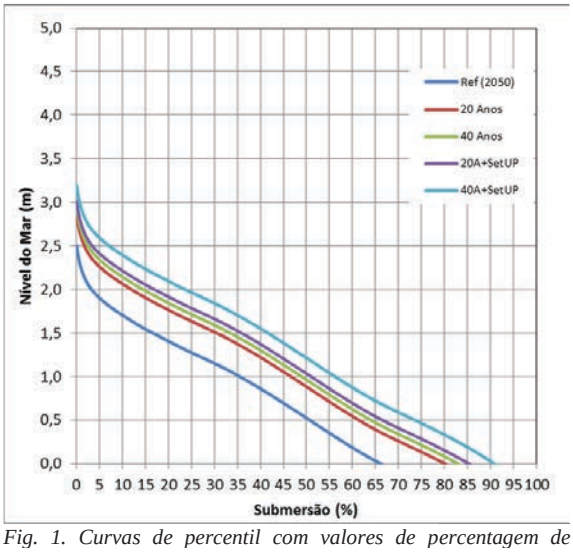


Fig. 1. Curvas de percentil com valores de percentagem de submersão de referência projetado para o NMM de 2050, para períodos de retorno de SM de 20 e 40 anos, e para os mesmos períodos de retorno conjugados com efeito de setup de vento. Alturas referidas ao datum vertical de Cascais de 1938.

Através dos modelos de frequência apresentados nas figuras 1 e 2 é possível extrair as cotas de inundação (Tabela I, II e III) para os vários cenários considerados.

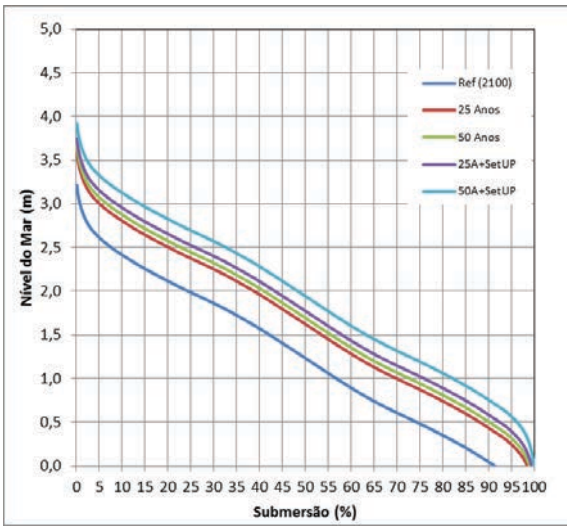


Fig. 2. Curvas de percentil com valores de percentagem de submersão projetado para o NMM de 2100, para períodos de retorno de SM de 25 e 50 anos, e para os mesmos períodos de retorno conjugados com efeito de setup de vento. Alturas referidas ao datum vertical de Cascais de 1938.

Os cenários em análise foram definidos com uma letra maiúscula (A, B e C) que define o ano de cenário projetado (2025, 2050 e 2100), um número de ordem e uma letra minúscula (a e b) designando os fatores forçadores.

Assim, os cenários definidos são:

A1a – NMM em 2025, com maré e período de retorno de SM a 10 anos

A1b – A1a com SetUp de ondas e vento

A2a – NMM em 2025, com maré e período de retorno de SM a 20 anos

A2b – A2a com SetUp de ondas e vento

B3a – NMM em 2050, com maré e período de retorno de SM a 20 anos

B3b – B3a com SetUp de ondas e vento

B4a – NMM em 2050, com maré e período de retorno de SM a 40 anos

B4b – B4a com SetUp de ondas e vento

C5a – NMM em 2100, com maré e período de retorno de SM a 25 anos

C5b – C5a com SetUp de ondas e vento

C6a – NMM em 2100, com maré e período de retorno de SM a 50 anos

C6b – C6a com SetUp de ondas e vento

A partir das curvas de percentil de submersão anual são extraídas as cotas de inundação para os cenários de níveis máximos, correspondentes a 0,25% (máxima preia-mar), 5% (preia-mar de águas vivas) e 10% (preia-mar média), reproduzidos nas Tabelas I, II e III.

Tabela I. Valor das cotas de inundação para uma taxa de 0,25% de submersão (preia-mar máxima).

TABELA DE 0,25% SUBMERSÃO (Preia-Mar Máxima)									
	A (2025)			B (2050)			C (2100)		
	Ref	1 (10 anos)	2 (25 anos)	Ref	3 (20 anos)	4 (40 anos)	Ref	5 (25 anos)	6 (50 anos)
a	2,24	2,5	2,6	2,45	2,8	2,9	3,16	3,6	3,6
b		2,7	2,9		3,0	3,1		3,7	3,9

Tabela II. Valor das cotas de inundação para uma taxa de 5% de submersão (preia-mar de águas vivas).

TABELA DE 5% SUBMERSÃO (Preia-Mar de Águas-Vivas)									
	A (2025)			B (2050)			C (2100)		
	Ref	1 (10 anos)	2 (25 anos)	Ref	3 (20 anos)	4 (40 anos)	Ref	5 (25 anos)	6 (50 anos)
a	1,70	2,0	2,1	1,91	2,3	2,4	2,62	3,0	3,1
b		2,1	2,3		2,4	2,6		3,2	3,3

Tabela III. Valor das cotas de inundação para uma taxa de 10% de submersão (preia-mar média).

TABELA DE 10% SUBMERSÃO (Preia-Mar Média)									
	A (2025)			B (2050)			C (2100)		
	Ref	1 (10 anos)	2 (25 anos)	Ref	3 (20 anos)	4 (40 anos)	Ref	5 (25 anos)	6 (50 anos)
a	1,50	1,8	1,9	1,71	2,1	2,2	2,42	2,8	2,9
b		1,9	2,1		2,2	2,4		3,0	3,1

4. RESULTADOS

Neste trabalho pretende-se compreender quais as consequências com as alterações do NMM e SM, tal como a localização das zonas afetadas. A partir de máximos de inundação estimados para cada cenário é feita uma intersecção com o MDS com o qual se obtém a área inundada.

Embora neste trabalho se pretenda avaliar a vulnerabilidade desta zona às condições de forçamento do mar de origem climática e climatológica, até ao presente apenas foi possível identificar as zonas da cidade de Lisboa que serão afetadas para cada cenário e para cada percentagem temporal de submersão.

Para o estudo de vulnerabilidade foi considerada informação relativa aos transportes públicos, como rede ferroviária, linhas do metro, linhas de elétrico e a localização de estações de transportes públicos, tal como o edificado, rede viária e infraestruturas subterrâneas, como estacionamentos ou estações de metro.

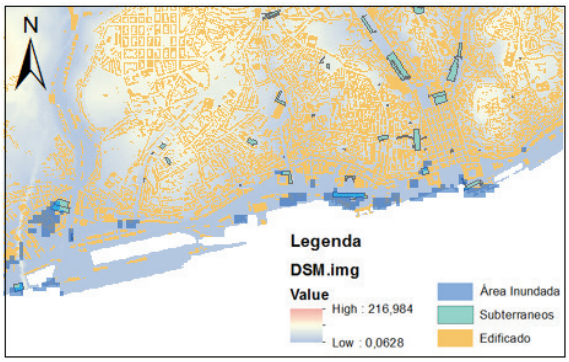


Fig. 3. Área inundada para o cenário A2a.

Desta forma foi então possível obter várias áreas de inundação, como demonstram as figuras 3, 4 e 5. No

primeiro caso (Figura 3) o cenário representado, A2a, é relativo a um nível de submersão de 0,25% numa praia-mar máxima para o ano de 2025 e com um período de retorno de SM de 25 anos sem qualquer influência de *setup* de vento. Este caso corresponde a um cenário de um futuro próximo que nos mostra que já nesta situação existem algumas infraestruturas públicas que possivelmente serão parcialmente afetadas. Tanto a estação ferroviária do Cais do Sodré como a estação do Terreiro do Paço serão afetadas por inundações esporádicas que poderão ocorrer em 0,25% do ano, correspondendo a algumas horas nos períodos de preia-mar de máximas marés vivas equinociais.

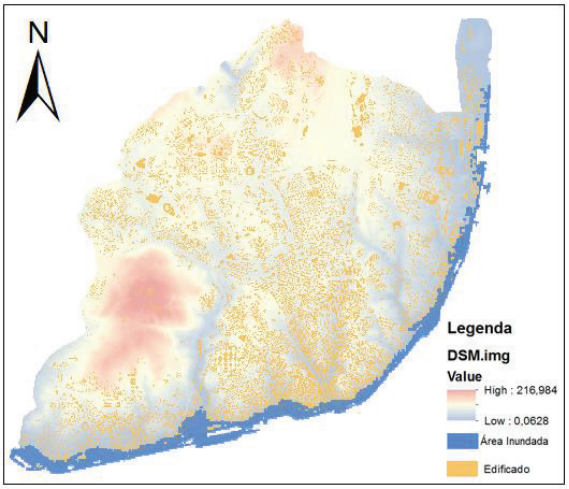


Fig. 4. Área inundada para o cenário C6b.

No caso de ocorrência do pior cenário previsto, C6b, representados na Figura 4, corresponde a um nível de submersão anual de 0,25%, numa praia-mar máxima para o ano de 2100, com um período de retorno de SM de 50 anos e com *setup* de vento. Este cenário, sendo ele o mais grave, revela uma extensa área vulnerável e exposta a inundação esporádicas.

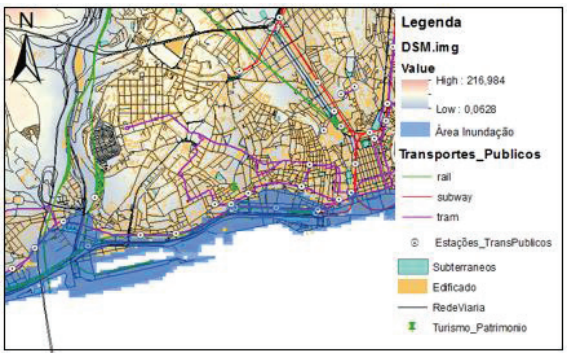


Fig. 5. Pormenor da área inundada como consequência do cenário C6b. Nesta figura está representado os locais mais críticos da subida do NMM que se localizam entre o Baixa-Chiado, cais do Sodré e Santos.

No pormenor do cenário C6b (Fig.5), verifica-se igualmente que a área mais suscetível é entre a Baixa-Chiado e Santos, e de Alcântara a Belém. Neste cenário, apresenta-se uma situação com um número muito mais elevado de infraestruturas afetadas.

5. CONCLUSÕES

Da análise feita aos resultados até agora obtidos, confirma-se que a subida do NMM, com forte probabilidade de ser causada pelas alterações climáticas e que poderão agravar-se nos próximos anos, com grande impacto na subida do NMM, mostra-se a vasta área que pode ser colocada em risco. Uma grande área urbana onde existem infraestruturas relevantes e de interesse público afetando, deste modo, diretamente a vida da população e a atividade económica da cidade, nomeadamente o turismo.

Um fator que influencia os resultados obtidos na avaliação de vulnerabilidade é a qualidade da informação geográfica, principalmente a informação relativa à georreferenciação das infraestruturas de transportes públicos, devido à origem e à falta de rigor da fonte de dados. Este trabalho encontra-se presentemente em desenvolvimento, esperando-se em breve, resultados mais definitivos e com uma real avaliação da vulnerabilidade da zona ribeirinha de Lisboa.

Agradecimentos

À Câmara Municipal de Lisboa pela disponibilidade dos dados referentes ao levantamento Lidar da cidade de Lisboa para a criação do Modelo Digital de Superfície (MDS).

REFERÊNCIAS

Antunes, C. e Godinho, J.M. (2011). Estudo da análise harmónica da maré aplicada ao marégrafo de Cascais. *Actas da VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia - CNCG2011*, 357-365.

Antunes, C. (2011). Variação actual do NMM em Cascais. *Actas da VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia - CNCG2011*, 366-373.

Antunes, C. (2014). Eventos Extremos e a Variação do Nível do Mar. *3ª Jornadas de Engenharia Hidrográfica*.

Taborda, R., e Dias, J. A. (1992). Análise da Sobreelevação do Mar de Origem Meteorológica durante os Temporais de Fevereiro/Março de 1978 e Dezembro de 1981. Geonovas, Nº 1 "*A Geologia e o Ambiente*", 89-97.

Vieira, R., Antunes, C., Taborda, R. (2012). Caracterização da sobreelevação meteorológica em Cascais nos Últimos 50 anos. *2ª Jornadas de Engenharia Hidrográfica*.

IPCC (2013). Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 1535 pp, doi: 10.1017/CB09781107415324.

Data discovery mechanisms and metadata handling in RAIA Coastal Observatory

Artur Rocha (1), Marco Amaro Oliveira (1), Filipe Freire (1), Gabriel David (1), Pedro Monteiro Vilar (2), Begoña Vila Taboada (2), Isabel Iglesias (3), Clara Lázaro (3), Luísa Bastos (3), Ilmer van Golde (4), A. Jorge Silva (4)

(1) Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC TEC), artur.rocha@inesctec.pt.

(2) Instituto Tecnlóxico para o Control do Medio Mariño de Galicia (INTECMAR).

(3) Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR).

(4) Instituto Hidrográfico.

Abstract: Effective metadata handling is determinant for successful data discovery among the organizations and in the context of a Distributed Oceanographic Observatory. However, in any distributed system, the harvesting of consistent metadata from data services implemented by distinct providers is not without obstacles. In this publication authors will describe how they are dealing with these issues in the scope of a service ecosystem that aims at providing interoperation with analogous infrastructures at a global scale. Topics such as: i) the adoption of controlled vocabularies; ii) the use of standard encodings both for data and metadata and; iii) the usage of service implementations in conformance with the INSPIRE technical recommendations will be discussed. Other aspects such as keeping the process of metadata inclusion efficient, by maximizing metadata descriptors that can be automatically harvested from data, thus minimizing the impact on data producers will also be addressed.

Key words: THREDDS, INSPIRE, catalogue service, nearshore forecasts, metadata, RAIA.

1. INTRODUCTION

Oceanographic Observatories such as RAIA are a joint effort undertaken by several organizations, distinct in competences and geographically disperse, that bring together specific thematic knowledge, along with established background practices when dealing with their data.

In this context, adherence to the technical standards and recommendations that enable the implementation of the INSPIRE directive transcends the need to discover and invoke services, which could be achieved in an *ad-hoc* way, but would pose serious threats in cross-referencing data produced at different sites. Therefore, the pursuit of truly interoperable and harmonized services, as foreseen in INSPIRE implementation recommendations (Council of European Union, 2007), and in annexes 6 and 7 of the directive, has been an underlying principle to the RAIA Coastal Observatory since its start (Vila *et al.*, 2012).

The Observatory includes several data and service providers, which are themselves consumers of the data and services delivered by their peers. In such architecture each provider acts as an independent node of the infrastructure of the Observatory.

As a node, not only each provider can have its own "customers", but it can also act as a link in the value chain to provide added-value products and services to end-users. Furthermore, each of the nodes can act as "display case" or even broker for products and services delivered by other nodes.

From the computational perspective, this builds up to a federated distributed computing infrastructure, which, in order to interoperate properly, relies in a set of standards in terms of the Application Programming Interface (API) to enquire both data and metadata, as well as in terms of the message formats and encodings that these APIs accept and return.

Since the RAIA Coastal Observatory needs to be able to deal with a variety of geographical data of different nature, from observations to forecasts, both in a discrete or aggregated fashion and also be able to account for distinct ways of exploring this data enhancing it according to the needs of target user groups, several standards are in use.

However, aside from proper implementation of these standards, the quality and completeness of services metadata and of the data they contain is of paramount importance to the overall quality of the resulting infrastructure, influencing the user's ability to find and effectively make use of the offered products and services.

2. PROBLEM DESCRIPTION

Past attempts revealed that setting up a catalogue service relying on geographically distributed data sources may lead to a poor end-user experience, even if the sources comply with standard APIs, such

as Web Map Service (WMS)(OGC, 2006), Web Feature Service (WFS)(OGC, 2010) or Web Coverage Service (WCS)(OGC, 2012a), and these return results which comply with standard schemas.

This is due to the fact that most data providers are driven by the goal of delivering "maps on the web", either using free or commercial implementations of standards, while not actually being sensitive to the rationale behind good metadata.

On the other hand the process of duly annotating published datasets can be tedious and time-consuming if not properly automated, in order to maximize what can be directly extracted from data.

3. METHODS AND IMPLEMENTATION

As previously stated, the Observatory needs to deal with geographical data of different natures, so it was established that providers would use the adequate implementations for each, in accordance to INSPIRE technical recommendations (INSPIRE, 2014).

For well-known interfaces such as WMS, WFS and WCS, popular implementations such as GeoServer (http://geoserver.org/) have been used. Nevertheless, particular attention was paid to filling service metadata in accordance to the foreseen in INSPIRE Metadata Annexes for the respective themes, such as Ocean Features and Meteorological Conditions.

This had a strong impact on the quality of metadata harvested by the geo-catalogue implementation, based on GeoNetwork (http://geonetwork-opensource.org/).

Observation data resulting from sensor systems such as buoys, meteorological stations or wind towers, was conveyed to implementations of the Sensor Observation Service (SOS) standard (OGC, 2012b), which returns sensor data using the Observations and Measurements (O&M) standard (OGC, 2011).

The major advantage of this standard is the ability to store, in a semantically rich way, any kind of observation about any feature (a real world phenomena or indirect ways to observe it), comprising one or several observed properties, along with the description of the process used to make the observation, such as the characteristics of the sensor, algorithm or system of these, used to observe the properties. In summary, the use of this standard ensures that observations of any application domain are stored and published in a self-describing way.

Graphical interfaces to explore and download the contents of the SOS have been developed (Fig. ***1***) and its contents are also continuously harvested by the geo-catalogue implementation.

Forecasts and other multi-variable aggregated data are often voluminous since they usually encompass several high-resolution geographic coverages, for multiple time frames, therefore the O&M standard is presently not the most efficient way to encode them.

For these, we opted to use the Network Common Data form (NetCDF) (Unidata, 2016a) encoding as it is an increasingly popular format, which is both efficient and semantically rich.

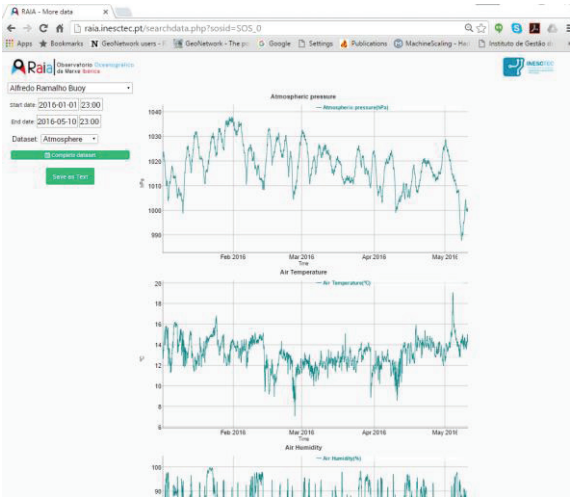


Fig. 1. Sensor Observation Service Client.

In fact, the NetCDF file header can accommodate both the metadata required by Common Data Format (CDF) (NASA, 2015) and ISO 19115-2 (ISO, 2009) standards, as well as to make use of the CF (Climate and Forecast) (Eaton *et al.*, 2011) convention for attribute names and units, that seems to suit most uses and includes clear rules on how to generate new attribute names. It has been agreed that data providers would use CF as controlled vocabulary to describe data, using version 1.4 and newer.

Providers deployed and configured Unidata's THREDDS Data Servers (TDS) (Unidata, 2016b), to publish this type of data. TDS implementations offer a large variety of standard APIs to get forecast data, as well as to verify the completeness of its associated metadata (see Figure 2).

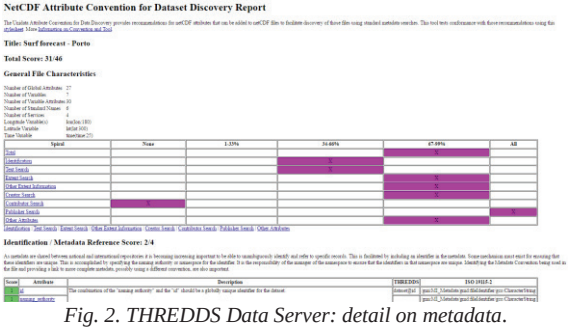


Fig. 2. THREDDS Data Server: detail on metadata.

Forecast data and similar products, are also harvested by the geo-catalogue implementations. Fig. ***3*** illustrates Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC TEC) geo-catalogue, although a similar service exists at Instituto Tecnlóxico para o Control do Medio Mariño de Galicia (INTECMAR). In fact, both catalogues index each other, in a process called catalogue federation.

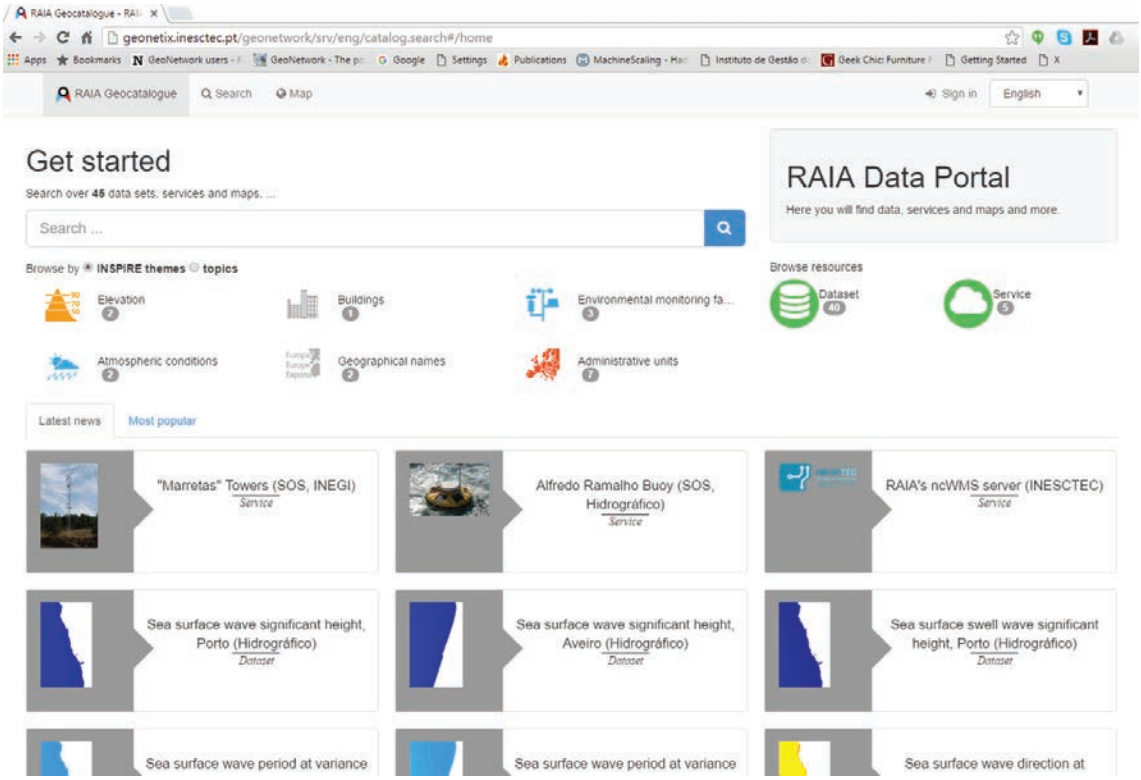


Fig. 3. Geo-catalogue interface example.

4. FINAL CONSIDERATIONS

Although the implementation of a Coastal Observatory is a permanent work in progress, due to the increasing amount of data sources and diverse new products and services, the applied methods contributed to improve the ability of end users to find and use the resources and value-added services made available by RAIA.

Furthermore, the adoption of standard encodings and APIs, increases the complexity of the implementation (and may reduce its pace) but largely compensates by enabling the realization of a system of systems, composed by similar infrastructures across the world.

Acknowledgements

This work is financed by the European Regional Development Fund (ERDF) through the Operational Programme for Competitiveness and Internationalisation – COMPETE Programme, and by National Funds through the Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT – Portuguese Foundation for Science and Technology) within projects POCI-01-0145-FEDER-006961, 0520-RAIA-CO-1-E and 0688-RAIATEC-1-P.

REFERENCES

Council of European Union (2007). Council Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council, of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE), available online http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32007L0002, published on 2007-03-14.

Eaton, B., Gregory, J., Drach, B., Taylor, K., Hankin, S., Caron, J., Signell, R., Bentley, P., Rappa, G., Höck, H., Pamment, A., Juckes, M. (2011). NetCDF Climate and Forecast (CF) Metadata Conventions, , available online http://cfconventions.org/cf-conventions/v1.6.0/cf-conventions.pdf, published on 2011-12-05.

INSPIRE (2014). INSPIRE Data Specifications Drafting Team, Technical Guidance for INSPIRE Spatial Data Services and services allowing spatial data services to be invoked, version 3.1, available online http://inspire.ec.europa.eu/index.cfm/pageid/241/documentid/3510, published on 2014-12-17.

ISO (2009). International Organization for Standardization, ISO 19115-2:2009 Geographic information - Metadata - Part 2: Extensions for imagery and gridded data, published on 2009-02-15.

NASA (2015). CDF User's Guide, NASA / Goddard Space Flight Center, available online http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/pub/software/cdf/doc/cdf361/cdf361ug.pdf, published on 2015-09-20.

OGC (2006). Open Geospatial Consortium, Web Map Server Implementation Specification, version 1.3.0 (also ISO 19128), Doc:06-042, available online http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=14416, published on 2006-03-15.

OGC (2010). Open Geospatial Consortium, Web Feature Service 2.0 Interface Standard, version 2.0.0 (also ISO 19142), Doc: 09-025r1, available online http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=39967, published on 2010-11-02.

OGC (2011). Open Geospatial Consortium, Observations and Measurements - XML Implementation, available online http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=41510, published on 2011-03-22.

OGC (2012a). Open Geospatial Consortium, WCS 2.0 Interface Standard- Core, version 2.0.1Doc: 09-110r4, available online https://portal.opengeospatial.org/files/09-110r4, published on 2012-07-12.

OGC (2012b). Open Geospatial Consortium, OGC® Sensor Observation Service Interface Standard, OGC 12-006, available online https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=47599, published on 2012-04-20.

Unidata (2016a). Unidata, Network Common Data Form, version 4.4.3, available online http://doi.org/10.5065/D6H70CW6, published on 2016-02-21.

Unidata (2016b). Unidata, THREDDS Data Server version 4.6.4, available online http://doi.org/10.5065/D6N014KG, published on 2016-02-16.

Vila, B., Gómez, A., Cortizas, C., Díaz. P., Oliveira, M.A., Rocha, A., Méndez, X.(2007). RAIA Observatory: Visualization of Oceanographic Data under INSPIRE Directive, in: *Atas das II Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, 2012.

A aplicação ANOSOM_SIG como ferramenta de gestão de risco em estruturas de proteção costeira e portuária

R. Lemos (1), J. Siva (1), C.J.E.M. Fortes (1), M.T. Reis (1) e P. Lopes (1,2)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, rlemos@lnec.pt.

(2) Universidade dos Açores.

Resumo: O LNEC tem implementado, desde 1986, um programa designado por OSOM (Observação Sistemática de Obras Marítimas) para quebra-mares de talude localizados em Portugal continental. Para armazenamento, consulta e análise da informação que vai sendo recolhida sobre os diferentes quebra-mares no programa OSOM, desenvolveu-se no LNEC a aplicação ANOSOM (Análise de Observação Sistemática de Obras Marítimas), a qual tem vindo a ser alvo de diversas atualizações, inclusivamente o manuseamento de nuvens de pontos provenientes de levantamentos dos quebra-mares com sistema de sondador multifeixe e/ou com a ajuda de UAV. Presentemente está em desenvolvimento uma aplicação Web a, ANOSOM_SIG, a qual virá a ser utilizada como interface da base de dados ANOSOM que inclui as funcionalidades de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), transformando-se assim, numa ferramenta de gestão de risco em estruturas de proteção costeira e portuária.
O objetivo desta comunicação é descrever a aplicação ANOSOM_SIG, bem como as suas funcionalidades até agora implementadas, apresentando alguns exemplos de aplicação.

Palavras-chave: Quebra-mares de talude, observação sistemática, levantamentos, gestão de risco, WebSIG.

1. INTRODUÇÃO

No dimensionamento de uma obra marítima assume-se que, durante o seu período de vida útil, haverá necessidade de realizar obras de reparação. Este facto, acrescido do potencial incremento de risco proveniente de alterações climáticas, vêm reforçar a já existente necessidade de uma ferramenta de gestão de risco para este tipo de obras.

A base de dados ANOSOM, desenvolvida pelo LNEC em Microsoft Access, tem sido, desde 1995, a principal ferramenta de diagnóstico de cerca de 36 estruturas de proteção portuária e de fixação de embocaduras localizadas ao longo de 19 pontos da costa. A base de dados ANOSOM (Reis e Silva, 1995, Lemos *et al.*, 2002, Ramalho, 2005, Lemos e Santos, 2007) contém toda a informação das inspeções visuais realizadas até à presente data.

Esta aplicação possui um caráter decisório, o qual tem vindo a ser utilizado em toda a sua plenitude na priorização das intervenções a realizar em termos de obras de manutenção/reparação, tendo sido adaptada a programas de observação sistemática na região autónoma dos Açores (Silva, 2010), em Macau (Reis *et al*, 2001) e de portos Marroquinos (Lemos *et al*, 2014).

Paralelamente tem vindo a ser realizada uma atualização da informação relativa à caracterização física e à informação documental e histórica de todas as obras sob a jurisdição da Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos, nomeadamente características geométricas e materiais utilizados. Outro trabalho, realizado posteriormente por Teixeira (2012), consistiu na compilação da informação relevante referente aos quebra-mares portugueses.

Neste âmbito, várias ferramentas foram já desenvolvidas por outros autores, tanto no âmbito da gestão do ciclo de vida de obras marítimas (Marujo *et al.*, 2013) como na análise da dinâmica costeira (Pires *et al.*, 2009).

Contudo, de modo a tornar a utilização da base de dados ANOSOM mais amigável e parcialmente acessível às entidades interessadas (entidades portuárias, projetistas e centros de investigação), tornou-se evidente a necessidade de proceder à sua implementação num sistema de informação desenvolvido em ambiente SIG.

Esta ferramenta, a ANOSOM_SIG, está a ser desenvolvida numa versão *desktop* que pode ser consultada, neste momento, mediante o fornecimento do endereço URL- *Uniform Resource Locator*, a sua versão preliminar *online* aplicada aos quebra-mares dos portos de Albufeira e da Ericeira.

Os próximos capítulos descrevem os métodos utilizados, bem como as funcionalidades implementadas até à data.

2. METODOLOGIA UTILIZADA

Para a criação da aplicação ANOSOM_SIG foi utilizada a plataforma ArcGIS, nas suas versões *desktop* e *online*.

Atendendo a que foi necessário migrar todos os dados já existentes na anterior base de dados ANOSOM. A primeira fase foi a criação de uma base de dados geográfica (*Geodatabase)* para onde foram importadas todas as tabelas relativas aos dados provenientes das inspeções periódicas, bem

como da caracterização física dos troços.
A este procedimento seguiu-se a criação de polígonos georreferenciados, através da delimitação dos troços em que se divide o quebra-mar, contendo toda a informação relativa ao respetivo troço. A cada um destes troços foi ainda anexada informação, tal como desenhos do perfil-tipo, fotografias, historial e gestão documental.
Toda esta informação foi projetada no mapa de base, tendo sido ainda agrupada por *layers* tornando este SIG mais *user-friendly*.
Selecionando uma *layer* é possível consultar a informação relativa a cada troço através de menus de informação "*pop-up*". A *Geodatabase* tem a possibilidade de ser tornada acessível pela internet utilizando as funcionalidades do ArcGIS Online.
A par deste procedimento de importação de dados para a nova aplicação, mantém-se ainda o processo de recolha e atualização da informação relativa aos dados de projeto das obras.

3. FUNCIONALIDADES

A aplicação ANOSOM_SIG já inclui, presentemente, os módulos correspondentes ao armazenamento e consulta de informação sobre os diferentes troços em que as estruturas são divididas, tais como:

- Historial das obras (ano de construção, intervenções realizadas, etc.);
- Caracterização física dos troços no que diz respeito aos limites físicos do troço, geometria, materiais utilizados e perfis-tipo;
- Dados das campanhas de observação sistemática, nomeadamente Estado Atual, Estado de Evolução e Estado de Risco, incluindo fotografias.

A figura. 1 ilustra o fluxograma representativo dos *inputs* dos módulos já implementados e previstos (a sombreado). Nos pontos seguintes serão ilustradas algumas das funcionalidades já disponíveis para consulta direta no mapa.

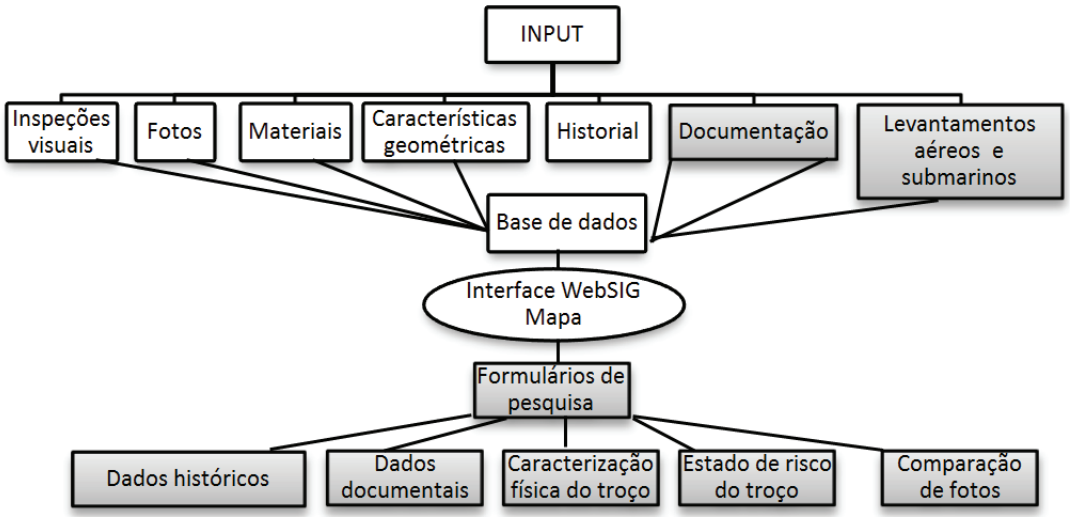


Fig. 1. Fluxograma da aplicação ANOSOM_SIG

3.1 Características geométricas

Selecionando na interface WebSIG a *layer* "Geometria", é possível, ao tocar na área do mapa que delimita o troço, consultar, através de uma caixa *pop-up*, as suas características geométricas. Nesta consulta encontram-se listadas as cotas e dimensões dos diferentes elementos constituintes da secção, bem como o desenho do perfil-tipo do troço selecionado. A figura 2 exemplifica uma consulta realizada ao molhe Nascente do porto de Albufeira.

3.2 Materiais

Tornando visível a *layer* dos materiais, é possível consultar o tipo de materiais constituintes dos diferentes elementos do perfil, como por exemplo os materiais do manto resistente, do talude interior, pé do talude, entre outros. Pode ainda ser consultada informação detalhada sobre estes materiais, tais como o peso, a natureza, a densidade, o modo de colocação, etc. Podem ainda ser anexadas aos menus *pop-up*, fotografias ilustrativas da estrutura. A figura 3 mostra uma consulta dos materiais utilizados nos troços A e C do molhe Poente do porto de Albufeira.

3.3 Estado do troço

Tornando visível a *layer* estado, o utilizador tem acesso ao estado atual, estado de evolução e estado de risco do troço selecionado. No menu *pop-up* correspondente encontram-se ainda disponíveis fotos do troço obtidas em anos diferentes, de modo a permitir uma análise comparativa do estado de conservação do troço. Pretende-se que este módulo venha a ser o mais importante na conversão da ANOSOM_SIG numa ferramenta de gestão do risco. A figura 4 ilustra uma consulta do estado do troço D do molhe do porto da Ericeira.



Fig. 2. Porto de Albufeira. Consulta da geometria dos troços.



Fig. 3. Porto de Albufeira. Exemplo de uma consulta dos materiais constituintes dos troços.

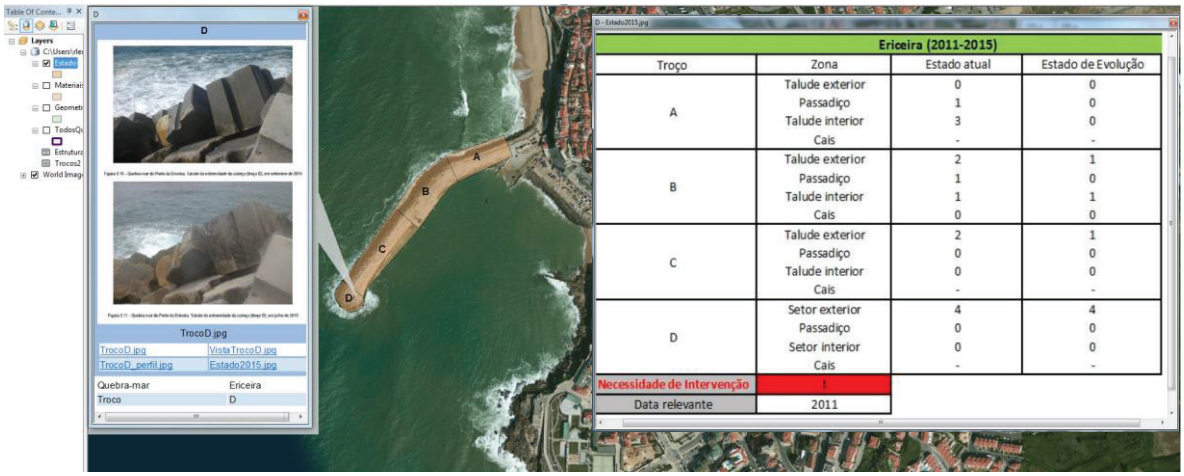


Fig. 4. Porto de Ericeira. Exemplo de uma consulta do estado de conservação dos troços.

4. A VERSÃO WEB

Mediante a utilização da plataforma *online*, é possível tornar a aplicação ANOSOM_SIG numa aplicação Web de fácil acesso. A figura 5 ilustra o aspeto da *layer* geometria. Esta versão encontra-se ainda em fase experimental, pretendendo-se que fique disponível logo que esteja concluída a importação da informação relativa a todos os portos, bem como reunido todo o seu historial.



Fig. 5. Porto de Albufeira. Consulta da geometria dos troços na versão online.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi apresentada a metodologia aplicada no desenvolvimento e na implementação do WebSIG da ANOSOM_SIG. Foram ainda descritas algumas das suas funcionalidades, bem como a sua aplicação aos portos de Albufeira e Ericeira, para os quais já foi concluída a compilação de toda a informação a importar para a base de dados. Contudo, algumas das funcionalidades estão ainda em desenvolvimento. Os trabalhos a desenvolver focam-se essencialmente na:

- Importação da informação existente para a base de dados, nomeadamente a anexação de fotografias descritivas do estado de evolução da obra;
- Compilação de toda a documentação existente relativa aos molhes, nomeadamente estudos, levantamentos, projetos, fotos, etc.;
- Elaboração dos formulários de pesquisa;
- Elaboração dos formulários para análise de nuvens de pontos provenientes de levantamentos aéreos e submarinos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento do projeto europeu H2020-INFRA-2014-2015, N.654110 – Hydralab+ Adaptation for Climate Change e do projeto HIDRALERTA (PTDC/AAC-AMB /120702/2010), financiado pela FCT. Os autores agradecem ainda aos Engºs Luís Inês António Santana e Engª Filipa Duarte da Docapesca Faro, pelo fornecimento de informação relevante.

REFERÊNCIAS

Lemos, R; Reis, M.T.; Silva, L.G. (2002). Observação Sistemática de Obras Marítimas. ANOSOM: *Base de Dados de Comportamento de Estruturas. Manual do Utilizador*. Relatório 318/02 - NPP, novembro de 2002.

Lemos, R.; Santos, J.A. (2007). Análise de Observação Sistemática de Obras Marítimas – ANOSOM. B*ase de dados de Inspeções de Quebra-mares de Taludes*. Relatório de Projeto 301/07. NPE, LNEC.

Lemos, R; Silva, L.G., Fortes, C.J.E.M. (2014). Port de Nador. Base de données ANOSOM_NADOR - Manuel d'utilisation - NPE, LNEC.

Marújo, N., Valle, A., Caldeira, J., Teixeira, A., Araújo, A. (2013). Gestão, Monitorização e Inspeção de Obras Marítimas. *Atas das 8ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. LNEC.*

Pires, A., Gomes, A., Chaminé, H. (2009). Dynamics of Coastal Systems Using GIS Analysis and Geomaterials Evaluation for Groins. *Environmental & Engineering Geoscience Magazine*, Vol. XV, No. 4, November 2009, pp. 245–260.

Ramalho, C.P. (2005). ANOSOM - Relatório de Projeto de Final de Curso. Universidade Nova de Lisboa, fevereiro de 2005.

Silva, L.G. (2010) - "Observação Sistemática de Obras Marítimas. Plano para implementação de um projecto na Região Autónoma dos Açores". Relatório 403/2010 – NPE, LNEC.

Reis, M.T.; Silva, L.G (1995). Observação Sistemática de Obras Marítimas. Base de Dados ANOSOM: Manual de Utilização. LNEC, Lisboa, dezembro de 1995.

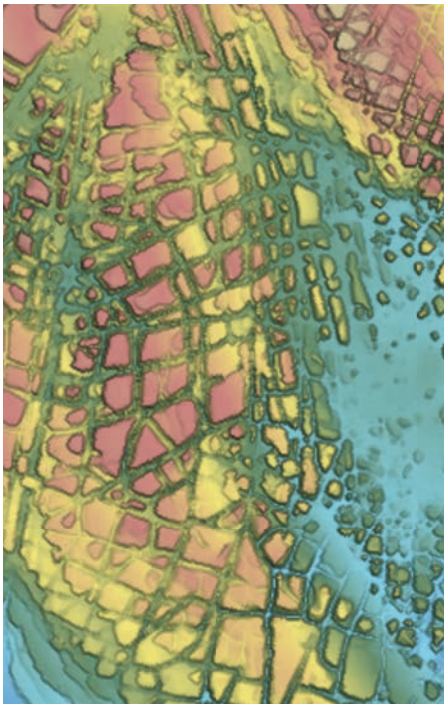
Reis, M. T.; Lemos, R; Silva, L. G. (2001) - "Monitoring the Coastal Structures of Macau International Airport ANOSOM: A Structure Behaviour Database. User's manual". Relatório 227/01 - NPP, Setembro de 2001.

Teixeira, R. (2012). Quebra-mares portugueses. Inventário e análise comparativa de soluções. Dissertação para obtenção do grau de Mestre. FEUP, Porto.

TECNOLOGIAS DO MAR E ENGENHARIA OCEANOGRÁFICA

4as JORNADAS DE ENGENHARIA HIDROGRÁFICA

21, 22 E 23 DE JUNHO DE 2016



Deteção, localização e inspeção dos destroços do caça minas "Roberto Ivens"

F. Ferreira (1), P. Costa (2), M. Miranda (1) e C. Fradique (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa; frederico.ferreira@hidrografico.pt.

(2) Instituto de História Contemporânea, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas da Universidade Nova de Lisboa.

Resumo: O Instituto Hidrográfico tem a capacidade através de diferentes equipamentos e meios técnicos de detetar e localizar objetos afundados, com recurso a técnicas de sonar lateral, multifeixe, magnetometria, auxiliados com Veículos Operados Remotamente (ROV). Estas técnicas permitem reunir informação que poderá ser utilizada no apoio a atividades militar, arqueológica e para fins comerciais (prestações de serviço).
A presente comunicação propõe realizar um enquadramento histórico e descrever os equipamentos e técnicas utilizadas na deteção, localização e inspeção dos destroços do caça minas "Roberto Ivens".

Palavras-chave: caça minas "Roberto Ivens", sonar lateral, multifeixe, ROV, magnetómetro.

1. INTRODUÇÃO

A definição do caça minas "Roberto Ivens" como alvo foi estabelecida, tendo em consideração as comemorações do 100º aniversário da entrada de Portugal na 1ª guerra mundial, 9 de março de 2016. Após contatos prévios efetuados pelo Instituto de História Contemporânea (IHC) com a Marinha Portuguesa, foi lançado o desafio ao Instituto Hidrográfico (IH) de detetar, localizar e inspecionar o "Roberto Ivens". A coordenação desta atividade de cooperação foi assumida pela Comissão Cultural de Marinha (CCM).

O IH aproveitou esta oportunidade para efetuar treino interno, colocando ao serviço da comunidade científica, os principais sistemas que dispõe nas operações de busca e inspeção de objetos submersos.

Em fevereiro de 2016, foram empenhados na deteção, localização e identificação dos destroços do "Roberto Ivens" os sistemas de sonar de pesquisa lateral, magnetometria, posicionamento acústico e ROV (*Remotely Operated Vehicle*) a bordo do NRP "Andrómeda e, de sondador multifeixe a bordo da UAM "Atlanta".

O local dos trabalhos foi estabelecido pelos investigadores do IHC, que de acordo com a investigação em curso suspeitavam da zona onde poderiam estar os destroços.

Esta publicação pretende descrever os meios e técnicas que foram utilizados pelo IH, na deteção, localização e inspeção dos destroços do caça minas "Roberto Ivens" e um breve enquadramentos histórico.

Fradique *et al.*, (2014) realizaram um trabalho semelhante na área do parque de mergulho recreativo Ocean Revival, em Portimão, onde é conhecida a posição dos navios afundados.

2. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

O caça-minas "Roberto Ivens" foi construído em 1906 pela empresa de construção naval britânica Cochrane & Sons, Shipbuilders, por encomenda do armador Pickering & Haldane's Steam Trawling Co.. Foi batizado "Lord Nunburnholme", e a Lloyds's Register (*explanations of records in the register books*) atribuiu-lhe a classificação 100 A.I. como embarcação destinada à pesca. Neste caso tratou-se de um arrastão.

Foi construído em aço com o tabuado do convés em madeira de pinho e possuía um comprimento de 42,72 metros, uma boca de 6,80 metros e tinha de pontal 3,63 metros.

Em maio de 1914 tornou-se propriedade da Sociedade de Pescarias a Vapor, com sede no Porto, que o batizou como "Lordelo". Após a entrada de Portugal na Grande Guerra, em março de 1916, a Marinha Portuguesa requisitou-o ao seu proprietário civil e a 19 de abril de 1916 é referido pela primeira vez na Ordem da Armada 4A com o nome "Roberto Ivens" e com a classificação Caça-minas (Figura 1).



Fig. 1. Fotografia do caça minas "Roberto Ivens" (Arquivo Fotográfico da Marinha – SN_16417_CacaMinas_RobertoIvens).

É nessas funções que a 26 de julho de 1917, durante uma missão de rocega na barra do rio Tejo, colidiu com uma mina colocada pelo submarino imperial alemão UC54. Segundo o relato dos sobreviventes a mina explodiu sob a câmara do comandante, partindo o navio ao meio e tendo este afundado em cerca de um minuto. No afundamento pereceram 15 homens, entre eles o comandante, Primeiro-Tenente Raúl Cascais. O Caça-minas "Roberto Ivens" foi o primeiro navio da Armada a perder-se devido a uma ação de guerra durante a Grande Guerra.

O jornal "O Mundo" (27/07/1917), o jornal "A Manhã" (27/09/1917) e o jornal "O Século" (28/07/1917) fazem referência a uma nota oficiosa emitida pelo Ministério da Marinha que situou o afundamento do "Roberto Ivens" "um pouco a norte do cabo Espichel" e "12 milhas a sul de Cascais". No entanto, as profundidades atingidas nessa área levaram a que se duvidasse do rigor da informação. Recorrendo a fontes estrangeiras, como os diários de guerra dos submarinos imperiais alemães e mapas fornecidos pelo Almirantado Britânico à Marinha Portuguesa após o fim da guerra, foi possível conhecer a localização de minas em águas nacionais, nomeadamente na barra do Tejo. A confirmação da existência de um campo de minas a sul do Bugio, num local onde a comunidade piscatória já tinha referenciado um destroço em 1970, consolidou a hipótese de se estar perante o destroço do caça-minas "Roberto Ivens". A suspeita foi confirmada, num mergulho realizado por um dos autores em 15 de setembro de 2013, após observação direta do destroço através de mergulho com escafandro autónomo. O passo seguinte foi a prospeção geofísica do destroço.

3. TRABALHOS DE CAMPO

Na deteção e localização dos destroços foram utilizados o sonar de pesquisa lateral, o magnetómetro e/ou o sondador multifeixe. Na inspeção dos destroços foi utilizado o ROV com o apoio do posicionamento acústico (*Global Acoustic Positioning System* (GAPS)).

3.1. Sistema de sonar de pesquisa lateral

Foi empenhado o sonar de pesquisa lateral KLEIN 5000, que consiste num sistema de sonar de múltiplos feixes (5 de cada bordo), com focagem dinâmica que permite a obtenção de sonografias de elevada resolução do fundo marinho, permitindo a deteção de objetos que estejam no fundo marinho ou na coluna de água (L-3 KLEIN, 2007).

Este sistema foi rebocado a partir do NRP "Andrómeda", utilizando um guincho eletromecânico, com controlo da distância de afastamento ao navio, a qual foi variável.

Os trabalhos foram iniciados na área onde existia fortes possibilidades de encontrar os destroços. No entanto, após cobertura de 2,6 km^2, nenhum objeto foi detetado. Foi avaliada outra informação disponível e definida nova área de trabalho, desviada 1 milha para NE, tendo sido detetados os destroços do caça minas "Roberto Ivens".

No total, com este sistema, foram realizadas 21 fiadas, com alcance lateral de 75 m a 455 kHz. O levantamento cobriu uma área de 3 km^2.

3.2. Sistema de magnetometria

O equipamento utilizado foi o magnetómetro de precessão protónica, SEASPY. O SEASPY é um magnetómetro rebocável que permite obter o valor de campo magnético local, permitindo assim, detetar qualquer objeto à superfície do fundo marinho ou enterrado no sedimento, desde que esse objeto seja constituído por materiais magnéticos.

Após a identificação dos destroços nos registos de sonar de pesquisa lateral, o sistema magnetometria SEASPY permitiu obter a sua anomalia magnética. O levantamento consistiu na realização de 2 fiadas, onde o registo magnético detetado nos destroços, a uma distância aproximadamente de 23 m a SW, equivale a uma anomalia pico-a-pico de 116 nT.

3.3 Sistema sondador multifeixe

Para as buscas do caça minas "Roberto Ivens" foi utilizado o sistema sondador multifeixe (SMF) KONGSBERG EM 2040C. O SMF EM 2040C é um sistema que permite a medição de profundidades, através da medição do tempo decorrido entre a emissão de um impulso acústico e a sua receção. Este sistema, de elevada resolução, é utilizado em baixas e médias profundidades, e pode ser utilizado para a investigação e deteção de objetos. O SMF EM 2040C permite adquirir até 400 sondas por impulso, operando nas frequências de 200 a 400 kHz (em intervalos de 10 kHz). Com uma faixa sondada de 130º (65º para cada bordo) até aos 300 kHz e que diminui para 70ª (35º para cada bordo) nos 400 kHz, permite efetuar uma busca total do fundo de aproximadamente 4 vezes a profundidade a operar nos 300kHz e de aproximadamente 1, 5 vezes a profundidade nos 400 kHz.

O levantamento com o SMF foi realizado após a deteção dos destroços com o sonar de pesquisa lateral. Foram realizadas 4 fiadas (2 paralelas e 2 perpendiculares à batimetria) com o SMF a operar nos 300 kHz e 4 fiadas com as mesmas características com o sistema a 400 kHz.

3.4. Sistema ROV

O ROV "Navajo" é um veículo subaquático, controlado remotamente, utilizado na inspeção de objetos e estruturas submarinas que se encontrem à superfície (por exemplo: destroços e embarcações afundadas; aviões acidentados; emissários; cabos; pilares de pontes e cabos submarinos). Trata-se de um sistema muito versátil, podendo ser utilizado tanto *offshore* como *inshore*. O seu peso e tamanho

permitem um transporte e operação fáceis a partir de qualquer tipo de plataforma, sendo ainda uma base estável para a colocação de sensores auxiliares, tais como sonar, câmaras de vídeo e manípulos.

O ROV do IH para além dos sensores padrão (altímetro, câmara, luzes, etc.), possui um sonar de pesquisa circular de dupla frequência (entre 600 kHz e 300 kHz), utilizado como auxiliar à navegação no fundo. Possui também um *imaging* sonar, ou câmara acústica, de 900 kHz, que permite obter imagens dinâmicas de alta resolução, em tempo real, nos locais onde a visibilidade é praticamente nula.

O ROV está também equipado com um sistema de posicionamento acústico (GAPS) (com uma incerteza de 0,4% da distância, num intervalo de confiança de 95%), que garante o conhecimento da posição absoluta do veículo debaixo de água em tempo real. Este ROV permite atingir a profundidade máxima de 200 m.

4. TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Os dados adquiridos pelos diferentes sistemas foram processados e interpretados individualmente, tendo em vista a avaliação individual da adequabilidade do sistema à deteção de objetos com interesse histórico/arqueológico.

4.1. Retrodispersão acústica

Os dados adquiridos com o sonar de pesquisa lateral, foram processados com o *software* IXSEA DELPH SONAR INTERPRETATION, consistindo na aplicação das correções geométricas e radiométricas que são possíveis de ser aplicadas a este tipo de sistema (ganhos variáveis no tempo, correção de velocidade, remoção da coluna de água, correção da obliquidade considerando o fundo como sendo plano, correção do *offset* entre os transdutores e sistema de posicionamento *Differential Global Positioning System* (DGPS)) (IXSEA, 2008). Os destroços do caça-minas Roberto Ivens foram localizados e identificados, na posição 38º35'00,23''N - 009º19'38,03''W com orientação NNE-SSW, assim como vários cabos e artes de pesca, depositados no fundo. Esta localização permite verificar que a ameaça submarina alemã chegou mais perto de Lisboa do que se julgava.

As imagens obtidas com o sonar lateral são de qualidade e permitem identificar as estruturas exteriores do navio com nitidez (Figura 2). É possível reconhecer os quatros poços de acesso ao porão (Figura 4).

4.2. Informação batimétrica

Os dados adquiridos com o SMF foram processados com o *software* CARIS HIPS v.9.0.22. Foi efetuado o controlo de qualidade dos dados tendo em consideração a correção e georreferenciação das sondas, a incerteza das medições e exatidão do sistema de posicionamento.

Como produto final foi elaborado um modelo batimétrico com 0,5 m de resolução, onde todas as profundidades obtidas são georreferenciadas (Fig. 3).

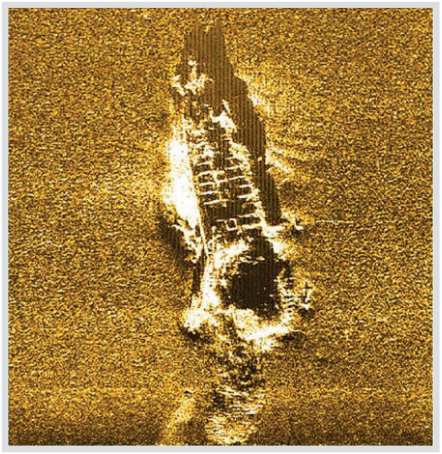


Fig. 2. Imagem do destroço obtida com o sonar lateral.

4.3. Campo magnético

O processamento de dados de magnetometria foi efetuado recorrendo a rotinas desenvolvidas no *software* MATLAB, descrito em Silva (2013). O registo magnético detetado no destroço, a uma distância aproximadamente de 23 m a SW, corresponde a uma anomalia pico-a-pico de 116 nT.

4.4. Imagens de vídeo e câmara acústica

As fracas condições de visibilidade, em consequência das condições meteorológicas adversas nas semanas que antecederam os trabalhos e à nebulosidade do dia em que ocorreu o mergulho de ROV, não permitiram adquirir imagens de vídeo com a qualidade desejável para a identificação visual dos destroços detetados. Seguindo o procedimento instituído para este tipo de situações, optou-se pela utilização da câmara acústica, a qual permitiu analisar, com bons resultados os vários aspetos dos destroços, como por exemplo os quatro poços de acesso ao porão.

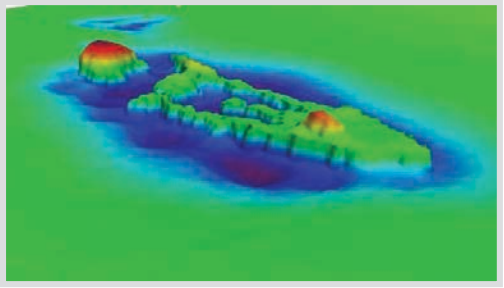


Fig. 3. Imagem do destroço obtida a partir dos dados de multifeixe (retirada do modelo batimétrico).

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O levantamento realizado com o sonar de pesquisa lateral permitiu localizar e detetar os destroços do navio, bem como outros objetos que se encontram

no fundo. As imagens acústicas de elevada resolução (sonar de pesquisa lateral, multifeixe e ROV) identificaram a natureza do destroço, tendo o magnetómetro registado uma anomalia de 116 nT.

O levantamento realizado com o sonar de pesquisa lateral permitiu reconhecer os quatro poços de acesso ao porão (verificando o menor espaçamento entre os poços centrais) e a caldeira concordantes com a planta do navio (Figura 4).

Após alguns adiamentos dos trabalhos, as condições meteo-oceanográficas, foram favoráveis à operação dos equipamentos, no entanto não permitiram ter boa visibilidade na coluna de água (impediu a aquisição de boas filmagens com o ROV).

Os levantamentos realizados com os diversos métodos de deteção de objetos (sonar de pesquisa lateral, sondador multifeixe e magnetometria) e o sistema ROV mostraram ser indicados para a deteção, localização e identificação de objetos com interesse histórico/arqueológico. Ao mesmo tempo, a localização do destroço numa posição distinta daquela onde sempre se presumiu que o "Roberto Ivens" se tinha perdido permite-nos uma nova perspetiva de estudo quanto à dimensão da ameaça submarina alemã em águas portuguesas durante a Grande Guerra.

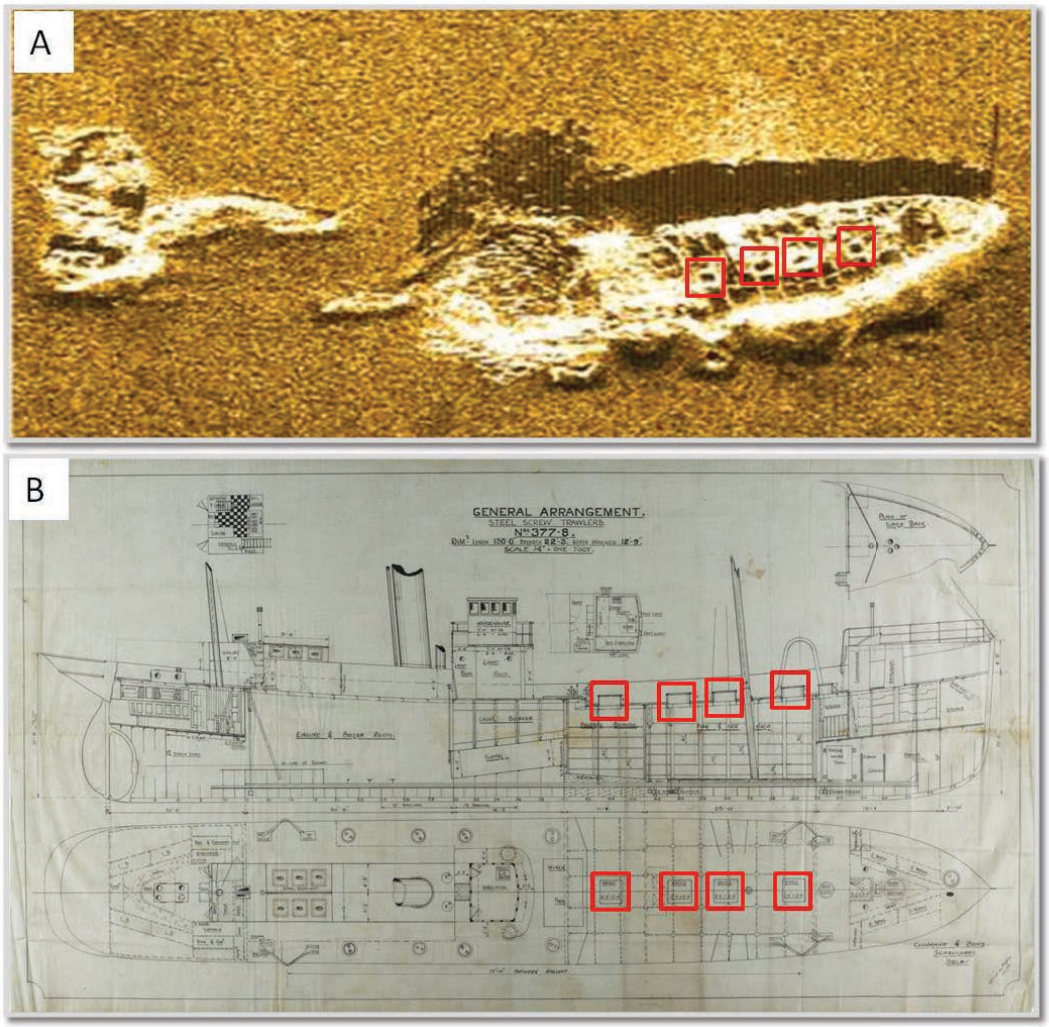


Fig. 4. A) Imagem detalhada do destroço obtida pelo sonar lateral do Instituto Hidrográfico; B) Planos do navio (North Yorkshire County Record Office ZZU 2/5/377/1). Em A) e B) os quadrados vermelhos representam os poços de acesso ao porão.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da guarnição do NRP "Andrómeda" e à guarnição da UAM "Atlanta".

REFERÊNCIAS

C. Fradique, S. Silva, F. Ferreira (2014). Busca e inspeção de objetos no fundo do mar – estudo de caso no parque Ocean Revival. 3.as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisboa, 373-376.

L-3 KLEIN (2007) – Series 5000 Sonar System – Operations and Maintenance Manual, 283pp.

IXSEA (2008). Delph Sonar – Advanced Notes, 43pp.

Silva, S. (2013). Desenvolvimento de uma metodologia para realização de levantamentos magnéticos marinhos para deteção de objetos. *Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, 92pp.

Análise numérica do desempenho de dois dispositivos de aproveitamento de energia das ondas de tipo coluna de água oscilante

E. Didier (1), P.R.F. Teixeira (2) e M.G. Neves (1)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 101 Av. do Brasil, 1700-066 Lisboa. edidier@lnec.pt

(2) Universidade Federal de Rio Grande, Escola de Engenharia, Av. Itália, km 8, Campus Carreiros, 96203-900 Rio grande, RS, Brasil.

Resumo: O dispositivo de aproveitamento de energia das ondas de tipo coluna de água oscilante (CAO) é um sistema que foi desenvolvido há já algumas décadas. Em condições de agitação marítima forte, pode ocorrer entrada de ar na câmara-de-ar do dispositivo, pela abertura submersa, comprometendo assim o seu rendimento. A colocação de uma parede vertical submersa, em frente ao dispositivo (UCAO), permite evitar este problema, mas altera o seu desempenho. Neste artigo, o modelo SPH é utilizado para uma primeira análise comparativa da hidrodinâmica dos dois dispositivos. Verifica-se que o factor de amplificação é fortemente condicionado pela dimensão da abertura submersa, reduzindo-se para uma abertura pequena, particularmente para os períodos de onda mais baixos. A amplitude da cava, na câmara de água e em frente ao dispositivo, é menor na configuração de UCAO que na CAO. É, assim, evidente que a UCAO reduz fortemente o risco de sucção de ar na câmara, embora reduza o factor de amplificação, quando comparada com a CAO.

Palavras-chave: energia das ondas, CAO, UCAO, Smoothed Particle Hydrodynamics.

1. INTRODUÇÃO

O dispositivo de aproveitamento de energia das ondas de tipo coluna de água oscilante (CAO) é um sistema que foi desenvolvido há já algumas décadas. Um dispositivo CAO é constituído por uma estrutura parcialmente submersa, aberta abaixo da superfície livre da água, dentro da qual fica aprisionada uma bolsa de ar, acima da superfície livre. O movimento oscilatório da superfície livre no interior na câmara pneumática, produzido pelas ondas incidentes, faz o ar escoar por uma turbina que está directamente acoplada a um gerador eléctrico. Alguns protótipos foram já construídos no mundo: os dispositivos do Pico, nos Açores, Portugal, e Limpet, na Escócia, estão construídos na linha de costa; os de Sakata, no Japão e, mais recentemente, Mutriku, em Espanha, estão incluídos em quebra-mares verticais, aproveitando, deste modo, uma estrutura existente e a energia disponível das ondas incidentes, normalmente maior que em dispositivos localizados na costa. No entanto, pode-se verificar, para agitação marítima forte, entrada de ar na câmara-de-ar do dispositivo, pela abertura submersa, comprometendo assim o seu rendimento. A colocação de uma parede vertical submersa, em frente ao dispositivo (UCAO), permite evitar este problema, mas altera o seu desempenho. Embora pareça uma solução alternativa interessante, não se encontram na literatura muitos estudos relacionados com este dispositivo (Boccotti, 2003, 2007a, 2007b; Boccotti *et al.*, 2007).

O objectivo do presente artigo é o de estudar e analisar o desempenho e o comportamento hidrodinâmico destes dois tipos de dispositivos recorrendo à modelação numérica. O modelo numérico SPHyCE (*Smoothed Particle Hydrodynamics for Coastal Engineering*) é o utilizado neste estudo (Didier e Neves, 2012; Didier *et al.*, 2014). SPHyCE é um modelo Lagrangiano de tipo SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) que permite simular escoamentos com superfície livre sem necessitar de malha computacional, o que permite modelar fenómenos complexos de interacção onda-estrutura, como a rebentação de ondas, o impacto de onda em estruturas e o galgamento. No presente estudo, a onda incidente é regular e são analisados vários períodos de onda, de 4 a 12 s, com regimes de onda incidente forte, com altura de onda entre 2 e 5 m, e varias configurações para os dois dispositivos.

2. MODELO NUMÉRICO SPHyCE

O modelo SPHyCE é baseado na formulação Lagrangiana das equações bidimensionais da Dinâmica dos Fluidos e num método de discretização de tipo SPH, que permite não recorrer a uma malha. Esta metodologia, na qual o fluido é considerado como constituído por volumes de água assimilados como partículas, permite modelar as trajectórias das partículas.

O modelo SPHyCE é derivado do modelo SPHysics (Gómez-Gesteira *et al.*, 2012) e da formulação SPH *standard* proposta por Monaghan (1994) baseada numa formulação de fluido pouco compressível. Graças à formulação Lagrangiana e à metodologia

sem malha, a técnica SPH revela-se particularmente interessante para modelar escoamentos com superfícies livres complexos, como a rebentação e o galgamento. O modelo SPHyCE integra uma técnica de geração de ondas com absorção activa de ondas reflectidas e várias opções especificamente desenvolvidas para aplicações de interacções ondas-estruturas costeiras (Didier e Neves, 2012; Didier *et al.*, 2014).

O modelo SPHyCE é utilizado no presente estudo, pois é especialmente bem adaptado à modelação de regime de onda incidente forte, com rebentação das ondas e impacto em estruturas costeiras.

3. DISPOSITIVO DE CAO / UCAO

O dispositivo de CAO / UCAO inspira-se no modelo de Boccotti (2007), integrado num quebra-mar vertical. A profundidade de água no pé do quebra-mar vertical é de 15 m. A câmara de água do dispositivo tem 5 m de comprimento e a profundidade é 10 m. As paredes têm 0.6 m de espessura. A abertura submersa para a câmara de água da CAO / UCAO está localizada a 10 m de profundidade e tem uma altura variável, *dlip*. No caso do dispositivo UCAO, uma parede vertical submersa é colocada em frente ao dispositivo, a uma distância *lu* e com submersão *du*. A Figura 1 apresenta um esquema dos dois dispositivos.

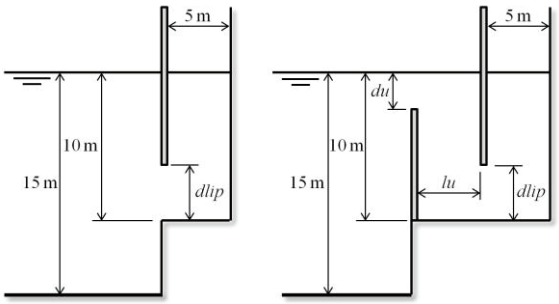


Fig. 1. Esquema do dispositivo CAO e UCAO.

No âmbito do presente estudo, feito à escala de protótipo, o canal de ondas tem um comprimento de um comprimento de onda e uma profundidade de 15 m. O canal é curto, mas as ondas reflectidas pelo dispositivo são absorvidas graças a absorção activa no batedor. A dimensão das partículas é de 0.1 m, o suficiente para esta aplicação, o que corresponde a aproximadamente 45000 a 212000 partículas, para períodos de onda de 4 e 12 s, respectivamente.

Como referido, a onda regular incidente tem um período entre 4 e 12 s e uma altura, *Ho*, entre 2 e 5 m.

O caso de referência da CAO tem a abertura submersa com *dlip*=5.0 m (Figura 1). O caso de referência da UCAO tem as características geométricas seguintes: *dlip*=5.0 m, *lu*=2.3 m e *du*=2.5 m (Figura 1).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados das simulações numéricas é realizada através do valor do factor de amplificação, *FA*, definido como a razão entre a altura média da superfície livre dentro da câmara e a altura da onda incidente, da altura de onda em frente à parede da câmara da CAO, normalizada pela altura de onda incidente, *H/Ho*, e das correspondentes elevações da superfície livre nas cristas e cavas, ηc e ηt respectivamente.

4.1. Resposta da CAO com variação de dlip

Um dos parâmetros importantes no projecto de um dispositivo CAO é a dimensão e a posição da abertura submersa, que condiciona a oscilação da superfície livre na câmara. A abertura é posicionada a 10 m de profundidade e duas aberturas são analisadas: *dlip* de 2.5 e 5.0 m. A onda incidente tem uma altura de 2 m e o período da onda vária entre 4 e 12 s. As Figuras 2 e 3 apresentam o *FA* e *H/Ho* e a elevação da superfície livre nas cristas e cavas correspondentes, respectivamente.

Verifica-se que, para os períodos de onda menores, o *FA* é fortemente condicionado pelo *dlip*. Para o período de 6 s, o *FA* é de 0.67 e 1.61 para o *dlip* de 2.5 e 5.0 m, respectivamente. Para o período de 8 s, a diferença de *FA* é mais pequena, com 1.79 e 1.96 para o *dlip* de 2.5 e 5.0 m, respectivamente, e tende a diminuir com o aumento do período. Verifica-se a mesma tendência para a elevação média na CAO da superfície na crista e cava, isto é, a envolvente da superfície livre na CAO. Em frente à CAO, não se nota uma diferença muito significativa de altura de onda e amplitude de crista e de cava com a variação do *dlip*, embora a diferença é maior para os períodos de 10 e 12 s.

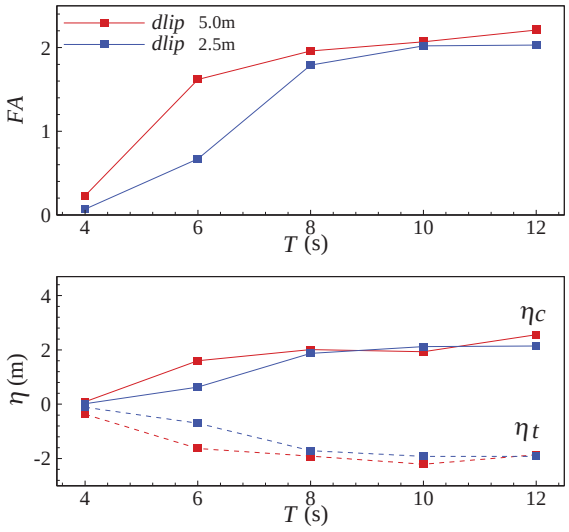


Fig. 2. Resposta da CAO com dlip 2.5 m e 5.0 m, para Ho=2 m e T=4-12 s: FA e amplitude de crista e cava.

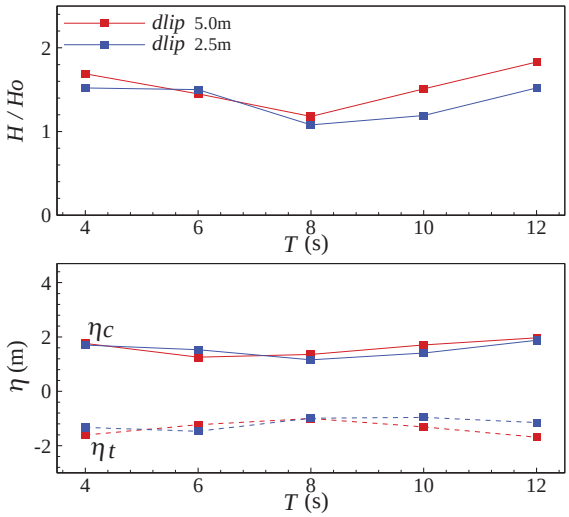


Fig. 3. Agitação em frente à CAO com dlip 2.5 m e 5.0 m, para Ho=2 m e T=4-12 s: H/Ho e amplitude de crista e cava.

4.2. Resposta da UCAO com variação de lu e dlip

Considera-se, neste caso, que a parede frontal em frente a CAO tem uma submersão constante, *du*, de 2.5 m. A influência da largura do tubo, *lu*, definida pela distância entre a parede frontal e a câmara de água, na resposta da UCAO, é analisada para o *dlip* de 5.0 m e três valores de *lu*, 1.3, 2.3 e 3.3 m, e para o *dlip* de 2.5.m e um valor de *lu* de 2.3 m. A onda incidente tem uma altura de 2 m e o período da onda varia entre 4 e 12 s. As Figuras 4 e 5 apresentam o valor de *FA* e *H/Ho* e a amplitude das cristas e cavas correspondentes, respectivamente.

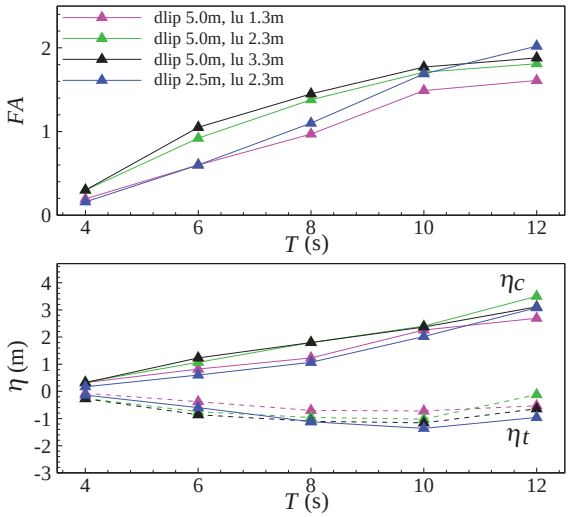


Fig. 4. Resposta da UCAO com lu 1.3, 2.3 e 3.3 m, dlip 2.5 m e 5.0 m, para Ho=2 m e T=4-12 s: FA e amplitude de crista e cava.

O *FA* aumenta quando o *lu* aumenta. O *FA* para *lu* de 2.3 e 3.3 m é muito similar, com uma diferença média de apenas 5%. A diferença de *FA* é mais importante com o caso *lu*=1.3 m, sendo a diferença média de 30% da do caso *lu*=3.3 m, e mais significativa para os períodos mais pequenos. O *FA*, para o caso *lu*=2.3 m e *dlip*=2.5 m, é muito inferior ao caso com *dlip* de 5.0 m, particularmente para os períodos pequenos. Para os períodos maiores o *dlip* parece não ter uma influência significativa sobre o *FA*. Em frente a CAO, não se nota diferenças muito significativas de altura de onda, *H*, e de amplitude de crista e de cava com a variação do *lu* e *dlip*. No entanto, essa altura da onda depende significativamente do período da onda e da configuração do dispositivo.

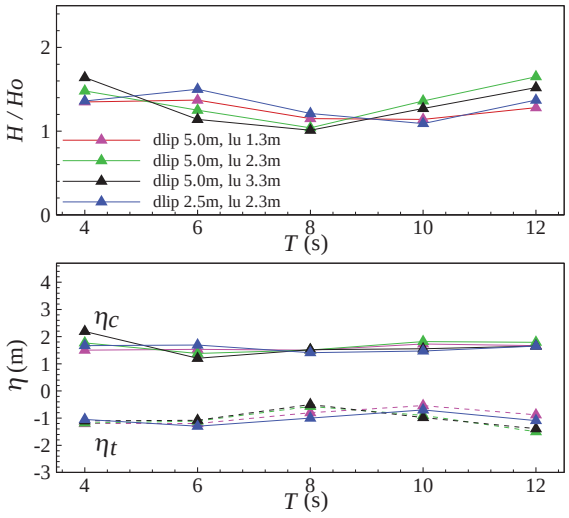


Fig. 5. Agitação em frente à UCAO com lu 1.3, 2.3 e 3.3 m, dlip 2.5 m e 5.0 m, para Ho=2 m e T=4-12 s: H/Ho e amplitude de crista e cava.

4.3. Resposta da CAO e UCAO com variação de altura de onda incidente para um período de 8 s

A resposta da CAO e UCAO (com *du*=2.5 m e *lu*=2.3 m), para dois *dlip*, 2.5 e 5.0 m, é aqui analisada para um período de onda intermédio, *T*=8 s, e uma altura de onda relativamente grande, variando entre 2 e 5 m. As Figuras 6 e 7 apresentam o valor de *FA* e *H/Ho* e as amplitudes das cristas e cavas correspondentes, respectivamente.

Pode-se verificar que o dispositivo CAO com *dlip* de 5.0 m tem o melhor desempenho em termos de *FA*. A UCAO com *dlip* de 5.0 m tem um *FA* mais pequeno, da ordem de 40%. A UCAO com *dlip* de 2.5 m tem um desempenho ainda menor para as alturas de onda de 2 e 3 m, mas fica igual à UCAO com *dlip* de 5.0 m para as alturas de onda de 4 e 5 m. Observando a Figura 6, verifica-se que a redução de *FA* para as UCAOs é principalmente devida à limitação da amplitude da cava, ficando quase independente da altura da onda incidente, com um valor em torno de 1.3 m. Não é o caso da CAO, na qual a amplitude da cava aumenta com a altura da onda incidente. É de notar também que a amplitude da crista, no caso da CAO, é sempre maior que para as UCAOs, as diferenças de amplitude das cristas ficando no entanto menor (média de ~15%) que as diferenças de amplitude das cavas (média de ~55%). Em frente ao dispositivo a altura de onda é menor no caso da CAO, sendo menos reflectiva que as UCAOs, o que se nota particularmente na amplitude da crista, a amplitude da cava ficando similar para os três casos.

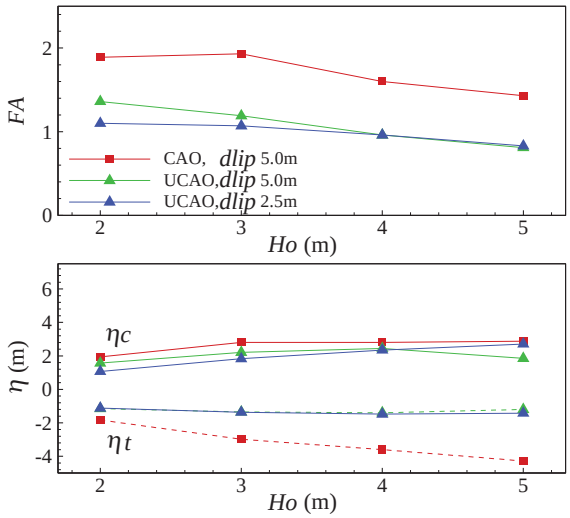


Fig. 6. Resposta da CAO (dlip 2.5 e 5.0 m) e UCAO (lu 2.3 m, dlip 5.0) para T=8 s e Ho=2-5 m: FA e amplitude de crista e cava.

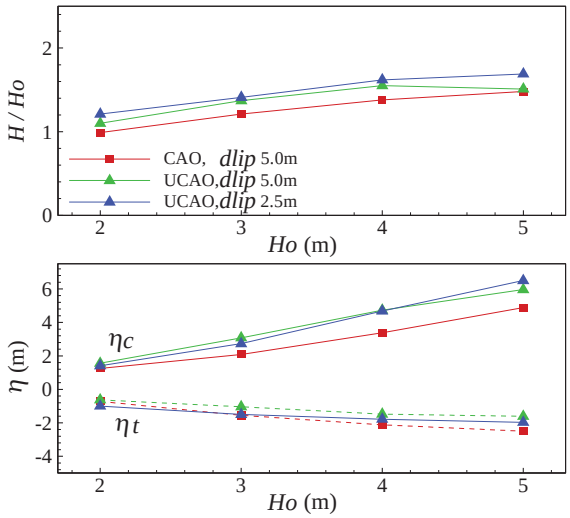


Fig. 7. Agitação em frente à CAO (dlip 2.5 e 5.0 m) e UCAO (lu 2.3 m, dlip 5.0) para T=8 s e Ho=2-5 m: H/Ho e amplitude de crista e cava.

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O estudo comparativo da resposta hidrodinâmica de um dispositivo CAO e UCAO, considerando uma onda incidente regular, permitiu analisar a influência de alguns parâmetros geométricos importantes:

- O factor de amplificação, *FA*, para a CAO e UCAO, é fortemente condicionado pela abertura da parede vertical, *dlip*, ficando menor para *dlip* menor, particularmente para os períodos de onda pequenos.

- A amplitude da cava, quer na câmara de água quer em frente ao dispositivo, é menor na configuração de UCAO que CAO, sendo esta redução variável entre 30% (para *T*=6 s) e 93% (para *T*=12 s) na câmara de água. É, assim, evidente que a configuração UCAO reduz fortemente o risco de entrada de ar na câmara, embora reduza o *FA* relativamente à CAO.

- As mesmas tendências se verificam com a variação da altura de onda incidente entre 2 a 5 m, para um período de 8 s.

- A UCAO tem um *FA* maior que o CAO, para *dlip* de 2.5 e 5.0 m apenas para período de onda de 4 s.

Os presentes resultados não mostram a mesma tendência que os obtidos por Boccotti, que indica que o dispositivo UCAO permite obter sempre um melhor desempenho que o CAO, excepto para o período de onda 4 s. No entanto, nas presentes simulações numéricas apenas a parte hidrodinâmica foi considerada, o que pode alterar os resultados e análises de desempenho dos dispositivos e explicar as diferenças com os resultados de Boccotti.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento concedido no projecto SFRH/BPD/97343/2013.

REFERÊNCIAS

Boccotti, P. (2003). On a new wave energy absorber. *Ocean Engineering*, 30, 1191-1200.

Boccotti, P. (2007). Comparison between a U-OWC and a conventional OWC. *Ocean Engineering*, 34, 799-805.

Boccotti, P. (2007a). Caisson breakwater embodying na OWC with a small opening-Part I: Theory. *Ocean Engineering*, 34, 806-819.

Boccotti, P., Filianoti, P., Fiamma, V., e Arena, F. (2007). Caisson breakwater embodying na OWC with a small opening-Part II: A small-scale field experimente. *Ocean Engineering*, 34, 820-841.

Didier, E., e Neves, M.G. (2012). A semi-infinite numerical wave flume using Smoothed Particle Hydrodynamics. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 22(3), 193-199.

Didier, E., Neves, D.R.C.B., Martins, R., e Neves, M.G. (2014). Wave interaction with a vertical Wall: SPH numerical and experimental modeling. *Ocean Engineering*, 88, 330-341.

Gómez-Gesteira, M., Rogers, B.D., Crespo, A.J.C., Dalrymple, R.A., Narayanaswamy, M., e Dominguez, J.M. (2012). SPHysics – development of a free-surface fluid solver – Part 1: Theory and formulations. *Computers & Geosciences*, 48, 289-299.

Monaghan, J.J. (1994). Simulating free surface flows with SPH. *Journal of Computational Physics*, 110, 399-406.

Sistema híbrido fotovoltaico/eólico/*diesel* aplicado a um navio – estudo energético, ambiental e económico

A. Nunes (1)

(1) Instituto Hidrográfico. Rua das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa E-mail: ana.nunes@hidrografico.pt ; acatarina.mnunes@gmail.com

Resumo: O aumento dos gases poluentes exige medidas urgentes, tais como projectos e tecnologias que optimizem a utilização de recursos renováveis na produção de energia. Este projecto centrou-se na implementação de um sistema híbrido fotovoltaico/eólico/*diesel* num navio de passageiros/veículos. Foram seleccionados os componentes do sistema híbrido: módulos fotovoltaicos, cabos eléctricos, turbinas eólicas, baterias de armazenamento, controladores de carga, inversores, sistema de controlo e monitorização, e o gerador a *diesel* do navio. Propôs-se um programa para o sistema de controlo, de forma a accionar o funcionamento do gerador a *diesel* quando os recursos renováveis forem insuficientes para alimentar as aplicações do navio. Após dimensionamento do sistema híbrido, fez-se uma análise ambiental e económica que evidencia uma redução das emissões de CO_2 em 81.56 % e a rentabilidade do projecto com um período de recuperação do capital de aproximadamente 6 anos.

Palavras-chave: sistema de energia híbrido, emissões poluentes, sustentabilidade, energias renováveis, navio fotovoltaico/eólico.

1. INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS[i]

Apesar de opiniões diversas sobre a origem do aquecimento global e da acidificação dos oceanos, já se admite que o aumento das concentrações de gases de efeito de estufa (GEE) e o aumento da temperatura global estão a alterar os sistemas que permitem o desenvolvimento de vida na Terra: estão a ser afectados a cobertura de nuvens, as chuvas, os padrões dos ventos, o nível médio das águas do mar, as correntes oceânicas e a distribuição de espécies de plantas e animais. O modo de vida da humanidade está a tornar-se insustentável e há que alterar essa situação, adoptando um compromisso global de forma célere e definindo prioridades (IMO, 2009). Existem cerca de 70 mil navios empregues no tráfego internacional, transportando 90 % das mercadorias do comércio mundial (MEPC, 2009), que emitem partículas e gases e contribuem para as alterações da composição química da atmosfera, da qualidade do ar a nível local e regional (maioritariamente áreas costeiras), e do clima (Eyring *et al.*, 2010). O aumento das preocupações ambientais e dos custos dos combustíveis têm originado uma necessidade de reduzir o consumo de combustível pelos navios (Lindstad *et al*., 2013).

O presente trabalho consistiu no estudo da implementação de um sistema de energia híbrido num navio, que inclui fontes de energia fotovoltaica (FV), eólica e a *diesel*. A investigação foi direccionada para as vertentes energética, económica e ambiental, analisando as alterações no consumo de combustível provocadas pela implementação do sistema e, consequentemente, nas emissões poluentes e na poupança de custos. O navio seleccionado para o estudo foi o "Lisbonense" que, sendo propriedade da Transtejo, efectua transporte de passageiros e veículos no Rio Tejo.

Perante o problema apresentado, os objectivos principais desta investigação foram: identificação das emissões provenientes de um navio com motor a *diesel* e dos danos ambientais consequentes, identificação de soluções tecnológicas que possibilitem aos navios um menor consumo de combustível; caracterização do navio "Lisbonense" e da sua área de navegação, incluindo variáveis meteorológicas que influenciam o sistema de energia híbrido; elaboração de um modelo teórico-prático de um sistema de energia híbrido FV/eólico/*diesel*, dimensionado e optimizado, aplicável ao navio; análise ambiental e económica do projecto.

2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1. Poluentes

Um dos focos ambientais, que tem restringido a regulamentação sobre os gases de escape, é a libertação de gases dos navios para a atmosfera (Park et al., 2001). A navegação mundial é um dos maiores contribuintes para as emissões de GEE, e presume-se ser responsável por 3 % do total de emissões de dióxido de carbono (CO_2) (Lee *et al*., 2013). Para além deste composto, são emitidos óxidos de azoto, monóxido de carbono, compostos orgânicos voláteis, dióxido de enxofre, carbono negro e matéria orgânica particulada (EEA, 2013). Estudos apresentados por Kaiser (2005), Nel (2005) e Pope *et al.* (2002) relacionam as concentrações de partículas com os impactos negativos para a saúde, incluindo asma, ataques cardíacos, internamentos nos hospitais e mortalidade prematura. Corbett *et al.* (2007) consideram que as emissões de partículas

relacionadas com o transporte marítimo são responsáveis por cerca de 60 000 mortes de origem cardiopulmonar e de cancro do pulmão, por ano, em que a maioria das mortes ocorre na Europa e na Ásia. Adicionalmente, as emissões dos navios podem provocar perturbações do ozono, deposição de compostos, acidificação dos oceanos e impactos nos ecossistemas (EEA, 2013).

2.2. Sistema de energia híbrido

Um sistema híbrido gera energia combinando duas ou mais fontes de energia diferentes, exibindo maior flexibilidade e melhor aproveitamento dos recursos e, consequentemente, a possibilidade de minimizar custos de produção relativamente aos sistemas que utilizam apenas uma fonte de energia. Se forem optimizados adequadamente, tornam-se mais rentáveis e confiáveis (Rehman *et al.*, 2012). Para além das fontes de energia, este tipo de sistemas inclui um controlador e um sistema opcional para armazenamento de energia, conferindo qualidade à mesma (Nema *et al.*, 2009). Os sistemas híbridos têm-se tornado populares devido aos avanços nas tecnologias das energias renováveis e ao aumento substancial no preço dos produtos petrolíferos (Maleki e Askarzadeh, 2014). Estes sistemas têm baixas emissões poluentes, mas ainda não têm um custo competitivo em relação aos sistemas de energia de combustível fóssil. Contudo, a necessidade de energia renovável e a evolução nas tecnologias poderão generalizar o uso destes sistemas (Lee *et al*., 2013). Entre os projectos de sistemas híbridos eólico/FV/*diesel* estudados, destaca-se o de Ekren *et al*. (2009) para pequenas aplicações na Turquia, o de Saheb-Koussa *et al.* (2009) para aplicações remotas na Argélia, o de Rehman *et al*. (2012) aplicável a uma vila da Arábia Sáudita, e o de Maleki e Askarzadeh (2014) que visa alimentar a rede eléctrica de Rafsanjan, no Irão. Contudo, não se obtiveram referências sobre este tipo de sistemas aplicado a navios. O mais semelhante é o sistema híbrido FV/*diesel* como, por exemplo, o que Park *et al*. (2001) propuseram para um navio pequeno de Osaka, no Japão.

3. METODOLOGIA

3.1. Navio de estudo

A fig. 1 e a tabela I apresentam as principais características do navio em estudo.



Fig. 1. "Lisbonense" a operar no Rio Tejo (Fonte: http://www.transportes-xxi.net/fotografia/foto/8271).

Tabela I. Características do "Lisbonense" (Transtejo,2014a).

Parâmetro	Valor
Comprimento	47.5 m
Calado máximo	2.2 m
Deslocamento	630 t (máximo)
Potência nominal do motor (Caterpillar C32 V12 ACERT)	634 kW
Potência máxima do gerador (Caterpillar C4.4 DITA)	65 kW (P eléctrica) / 75.4 kW (P mecânica)
Tensão do gerador	400 V
Velocidade serviço	11 nós
Potência dos equipamentos	39.4 kW (máximo)
Consumo dos equipamentos	4 horas/dia (média)

3.2. Área de estudo

O navio em estudo opera na área representada na fig.2, localizada no Rio Tejo. Inclui-se o trajecto efectuado pelo navio (Cacilhas – Cais do Sodré), num total de 1778 metros (0.96 milhas náuticas).



Fig. 2. Área de estudo do "Lisbonense" (Fonte: Google Earth).

A radiação solar no local (kWh/m^2/dia), para o subsistema FV, foi obtida através do WeatherOnline Ltd (2014); enquanto os registos horários do vento, para o subsistema eólico, foram fornecidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (2014). Os dados referem-se ao ano completo de 2013.

3.3. Dimensionamento e softwares de apoio

Após selecção dos componentes do sistema híbrido FV/eólico/*diesel*, fez-se o dimensionamento para o "Lisbonense", e optimizou-se o resultado. De modo a sustentar a optimização, recorreu-se aos *softwares HOMER* e *RETScreen* que, permitindo inserir os dados das fontes de energia (recursos renováveis disponíveis no local e o *diesel*), apresentam análises de emissões de GEE e análise económica.

4. RESULTADOS

4.1. Configuração do sistema híbrido

A configuração do sistema híbrido proposto inclui:

a) Sistema FV com 117 módulos (modelo FV 255-PQ60) (figs. 3 e 4) – 13 em série e 9 em paralelo – ligado ao barramento DC[1] do navio, a 390 V;
b) Sistema eólico constituído por 2 turbinas eólicas (modelo FE1024U) (figs. 3 e 4), ligado ao barramento DC do navio, a 24 V;
c) 33 baterias (em série) nos barramentos DC para armazenar a energia dos sistemas FV e eólico;
d) Inversor (2 unidades em paralelo), que converte a corrente DC a 390 V em AC[2] a 400 V;
e) Controlador de carga entre o sistema FV e o banco de baterias, e controlador de carga entre cada turbina eólica e o banco de baterias;

[1] Circuito de corrente contínua (*Direct Current*).

[2] Corrente Alternada (*Alternating Current*).

f) Gerador a *diesel* ligado ao barramento AC de 400 V do navio;
g) Sistema de controlo e monitorização para gerir e controlar os subsistemas de energia, incluindo o gerador a *diesel*, através de um programa.

Se a energia dos sistemas FV e eólico exceder as necessidades eléctricas do navio, o excesso carrega as baterias até os controladores de carga permitirem. Se a produção não for suficiente, assumindo que as baterias se encontram descarregadas, o gerador a *diesel* inicia a produção de energia eléctrica e fornece a quantidade remanescente.



Fig. 3. Módulo FV 255-PQ60 e Turbina eólica FE1024U 24V.

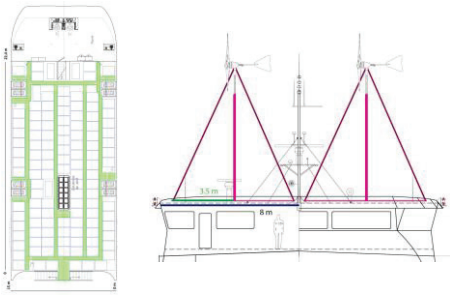


Fig. 4. Disposição dos módulos FV no convés do solário do "Lisbonense" e das turbinas eólicas no tecto da ponte.

A fig. 5 apresenta a configuração do sistema após a sua optimização, tendo em conta as necessidades eléctricas do navio, os recursos energéticos disponíveis (privilegiando os renováveis) e a relação custo-benefício de cada componente.

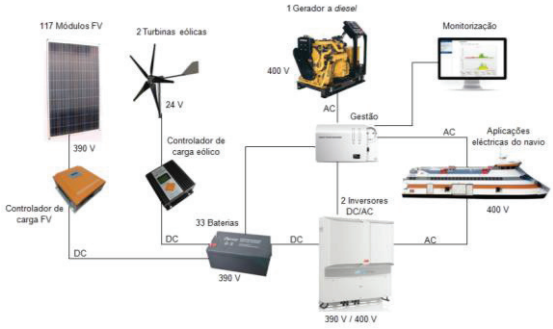


Fig. 5. Diagrama do sistema de energia híbrido FV/eólico/diesel

4.2. Análise ambiental

Quanto ao consumo de *diesel*, a tabela II apresenta as diferenças entre o sistema convencional e o híbrido; obtidas com base na informação mensal dos consumos do navio em 2013 (Transtejo, 2014b), e nos recursos renováveis referidos no subcapítulo 3.2. Obteve-se a média horária e uma extrapolação anual.

Verifica-se uma redução significativa no consumo de *diesel* e, consequentemente, na emissão de CO_2, do sistema híbrido em relação ao convencional.

Tabela II. Comparação de consumos de diesel e emissões de CO_2.

	Consumo de *diesel*		Emissão de CO_2	
	Anual (L)	Horário (L/h)	Anual (t)	Horária (Kg/h)
diesel	5637.67	3.90	15.17	10.50
híbrido	1039.39	0.72	2.80	1.94
Redução	4598.28	3.18	12.40	8.56
Redução total		81.56 %		

4.3. Análise económica

Na análise económica, o custo do *diesel* consumido é desprezado porque já é concretizado no sistema convencional; no entanto, a sua poupança derivada da implementação do projecto origina as receitas. Com base no plano de investimentos e no plano de exploração e manutenção do projecto, calculou-se o VAL (Valor actualizado líquido) do *Cash-Flow* total (receitas menos os custos de exploração e de investimentos) para o período de 20 anos (tempo de vida do projecto): 29 230.61 €. Como o VAL é positivo, o projecto é considerado rentável, justificando o investimento. O PRC (período de recuperação do capital), correspondente a 6 anos, 2 meses e 8 dias, indica também que se trata de um projecto rentável, em que os investimentos e as despesas são recuperados através das receitas após esse período (Abecassis e Cabral, 2010). Desde esse dia até ao fim de vida do sistema híbrido, prevê-se que o saldo seja sempre positivo. A curva do Cash-Flow total consta na fig. 6.

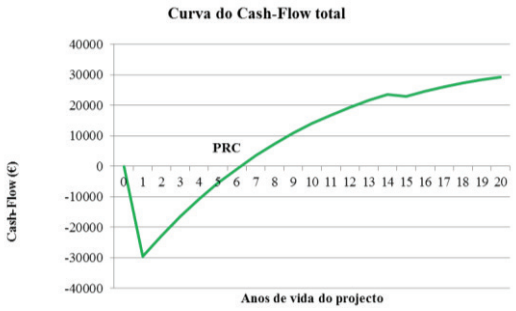


Fig. 6. Curva do Cash-Flow total do projecto em análise.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A utilização, durante décadas, de combustíveis fósseis, abrandou a inovação, o engenho e o desenvolvimento tecnológico para aproveitamento dos recursos renováveis não fósseis. É fundamental acelerar este progresso. O presente trabalho propõe a implementação de um sistema híbrido FV/eólico/*diesel* num navio, cujo principal objectivo é reduzir as emissões de GEE, nomeadamente o CO_2, através da utilização de energias FV e eólica, de forma sustentável e económica. Devido ao facto do sistema eléctrico do navio ser um sistema isolado, a navegar, a configuração do sistema híbrido foi mais complexa do que se estivesse ligado à rede eléctrica pública. Assim, é fundamental haver um sistema de monitorização e controlo dos componentes e dos fluxos energéticos. Conclui-se que a implementação do sistema híbrido aumenta a

autonomia do navio e a sua segurança. No caso de avaria do gerador a *diesel*, existem duas fontes de energia adicionais, às quais se somam as baterias. Este aumento de segurança energética também impede interrupções na alimentação eléctrica dos equipamentos, em caso de picos ou cortes. Concluiu-se que o sistema híbrido proposto é benéfico a nível ambiental, reduzindo as emissões atmosféricas poluentes comparativamente ao sistema convencional a *diesel*. Conclui-se ainda que o projecto é economicamente viável e rentável, tendo capacidade para recuperar os investimentos e despesas ao fim de 6 anos, 2 meses e 8 dias, num ciclo de 20 anos. Esta recuperação é feita através da poupança de *diesel* obtida com a implementação do novo sistema energético. Com base numa visão de futuro sustentável e nestas conclusões, recomenda-se um incremento no desenvolvimento de sistemas híbridos energéticos e dos seus componentes, principalmente aplicável a navios. É necessário continuar a aprimorar as tecnologias de forma a aproveitar os recursos renováveis que o planeta oferece. Apesar de terem um grande potencial no mar e nos rios, devido à ausência de obstáculos, o seu aproveitamento ainda é muito reduzido.

6. REFERÊNCIAS

Abecassis, F., e Cabral, N. (2010). *Análise económica e financeira de projectos*. Fundação Calouste Gulbenkian.

Corbett, J., Winebrake, J., Green, E., Kasibhatla, P., Eyring, V. & Lauer, A. (2007). Mortality from ship emissions: a global assessment. *Environmental Science & Technology*, 41(24), 8512–8518.

EEA (2013). European Environment Agency Technical report nº 4/2013: *The impact of international shipping on European air quality and climate forcing*.

Ekren, O., Ekren, B. & Ozerdem, B. (2009) Break-even analysis and size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage – A case study. *Applied Energy*, 86 (7-8), 1043-1054.

Eyring, V., Isaksen, I., Berntsen, T., Collins, W., Corbett, J., Endresen, O., Grainger, R., Moldanova, J., Schlager, H. e Stevenson, D. (2010). Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. *Atmospheric Environment*, 44, 4735–4771.

IMO (2009). Issue 3/2009. *IMO News Magazine*, 4-5 & 21- 28.

Instituto Português do Mar e da Atmosfera (2014). Valores médios horários de velocidade do vento e rumo do vento, observados na estação meteorológica de Lisboa/Tapada da Ajuda, no período de 01 de Janeiro de 2013 a 31 de Dezembro de 2013.

Kaiser, J. (2005) Epidemiology. Mounting Evidence Indicts Fine-Particle Pollution. *Science*, 307 (5717), 1858a–1861.

Lee, K., Shin, D., Yoo, D., Choi, H. e Kim, H. (2013). Hybrid photovoltaic/diesel green ship operating in standalone and grid-connected mode. *Energy*, 49, 475-483.

Lindstad, H., Asbjørnslett, B. e Strømman, A. (2011). Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds. *Energy Policy*, 39(6), 3456-3464.

Maleki, A. e Askarzadeh, A. (2014). Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 147-153.

MEPC (2009). MEPC.1/Circ.683. *Guidance for the development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP).* IMO.

Nel, A. (2005). Atmosphere. Enhanced: Air Pollution-Related Illness: Effects of Particles. *Science*, 308 (5723), 804–806.

Nema, P., Nema, R. e Rangnekar, S. (2009). A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2096–2103.

Park, J., Katagi, T., Yamamoto, S. e Hashimoto, T. (2001). Operation control of photovoltaic/diesel hybrid generating system considering fluctuation of solar radiation. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 67, 535-542.

Pope, C., Burnett, R., Thun, M., Calle, E., Krewski, D., Ito, K. e Thurston, G. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*, 287 (9), 1132–1141.

Rehman, S., Alam, M., Meyer, J. e Al-Hadhrami, L. (2012). Feasibility study of a wind-pv-diesel hybrid power system for a village. *Renewable Energy*, 38, 258-268.

Saheb-Koussa, D., Haddadi, M. e Belhamel, M. (2009). Economic and technical study of a hybrid system (wind-photovoltaic-diesel) for rural electrification in Algeria. *Applied Energy*, 86 (7-8), 1024-1030.

Transtejo (2014a). Características do "Lisbonense".

Transtejo (2014b). Livro de registo de consumos de combustível do "Lisbonense".

[i] O texto do presente documento não está escrito ao abrigo do novo Acordo Ortográfico.

Automatic SeaSonde HF Radar Antenna Pattern Generation Using AIS Data: Espichel Case Study

P. Agostinho (1), C. Whelan (2), C. Fernandes, (3) e A. Alonso-Martirena (1)

(1) Qualitas Remos; pedro.agostinho@qualitasremos.com

(2) Codar Ocean Sensors; chad@codar.com

(3) Instituto Hidrográfico; santos.fernandes@hidrografico.pt

Abstract: The SeaSonde® is an ocean observing technology that can measure surface currents, waves and also detect tsunamis and vessels. Currently there are five SeaSondes operating in Portugal, property of INSTITUTO HIDROGRÁFICO. The correct calibration of a SeaSonde, as any other sensing technology, is essential for the acquisition of reliable data. Part of this calibration is the Antenna Pattern Measurement (APM), which allows the effects on antenna's directional response from the surrounding environment to be taken into account during data processing. This procedure requires specific hardware, trained personnel and a small boat. CODAR has recently developed a technology that only requires AIS information and SeaSonde data in order to obtain the antenna pattern and monitor and detect variations due to changes of the antenna's environment or malfunctions. This study describes the application of this technology in Espichel Radar Station, made possible by the collaboration protocol existing between QUALITAS and INSTITUTO HIDROGRÁFICO.

Keywords: CODAR, SeaSonde, HF Radar, APM, AIS.

1. INTRODUCTION

The HF Radar CODAR SeaSonde is an observing technology that allows the measurement of surface currents, through the analysis of reflections by surface waves of electromagnetic signals sent from coastal stations. This technology is of critical importance for Operational Oceanography, as it can provide near real-time surface current for a wide area. Large national networks of HFR stations are being developed throughout the world. In Portugal, the leading institution in this topic is the INSTITUTO HIDROGRÁFICO (IH), with 5 stations currently in operation (3 in the Southern Coast and 2 in the Lisbon area).

As in all instrumentation technologies, the HF Radars require calibration, which is something that is independent of the system design (arrays or compact single-antenna technology). The surrounding environment to an antenna affects its properties (namely the antenna response pattern - the directional dependence of the received signals used for bearing determination), so it is necessary to take it into account when processing the received electromagnetic backscatter - (Paduan *et al*, 2006), (Flores-Vidal *et al*, 2012). In general, for the area within one electromagnetic wavelength of the receive antenna, changes to the ground or the composition of conductive or ferromagnetic material that scale one quarter wavelength or greater will have the most affect on the antenna response pattern. CODAR has developed a procedure in order to measure the antenna pattern, (APM), that has associated costs as it requires the use of specific hardware, a boat and trained personnel. This is generally done during installation and as needed afterward. A recent development has been the creation of an Auto-APM software package, that allows the monitoring of the antenna pattern over time and without the need of the above requirements and with good results, as seen by Evans *et al*, 2006 and Emery *et al*, 2014. The measurement of the pattern is obtained by associating ship echoes in the spectral HF Radar data with vessel positions from AIS messages, thus requiring an AIS receiver and an antenna.

2. OBJECTIVES

In this paper we discuss the performance and utility of the Auto-APM system with data from Espichel station, with the following objectives:

- Understand whether SeaSonde antenna pattern changes can be detected with the Auto-APM system;

- If so, define a Quality Assurance/Quality Control (QA/QC) procedure to monitor remotely the stability or lack of variation of the antenna pattern, and through this:

a) Have an objective method to increase the specified maintenance interval to do a field antenna pattern measurement;

b) Improve the overall output quality by having the capability to detect changes to the antenna and the antenna environment at the very early stage.

3. ANALYSIS DESCRIPTION

3.1. Espichel Station

The Espichel Station is located approximately 35 km south of Lisbon, and is one of two stations installed in the Lisbon area. It is installed in the lighthouse premises, and consists of a 13 MHz CODAR SeaSonde dome-style compact single T/R antenna system.



Fig. 1. Photo of Espichel Station, taken from the top of the lighthouse. SeaSonde antenna marked in red and buoy communications antenna marked in yellow.

3.1. Temporal Scope and Studied events

The analysis is focused between October 1st, 2014 and February 28th, 2016. In this period, there are two events that consisted of major changes to the antenna environment to be considered:

1) Installation of a buoy radio communications antenna, close to the SeaSonde antenna, from February 18th, 2015 to April 17th, 2015 (Fig. 1).

2) Radar antenna vertical whip fault, detected on December 7th, 2015 due to sudden increase of reflected power and decrease of forward power (Fig. 2).

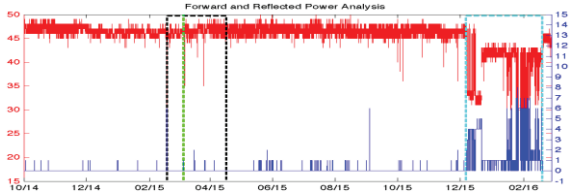


Fig. 2. Forward and Reflected Power plots, in the period of the study. Legend: red - forward power; blue - reflected power; green dotted line - Auto-APM software update; black dotted line - presence of buoy communications antenna; cyan dotted line - SeaSonde vertical whip failure

3.2. Data and Metrics

A compact SeaSonde antenna is composed by three antennas, combined in one single mast: two orthogonal directional loops and one omnidirectional dipole. In Fig. 3 it is presented an ideal pattern in its polar and Phase and Amplitude characteristics. The analyzed data will be the normalized Loop 1 and Loop 2 data obtained from the Auto-APM software and a pattern measured with a transponder from a vessel, measured on July 3rd, 2014 (Fig. 4). It is possible to understand the pattern characteristics for this station, with the main features pointed out with red arrows.

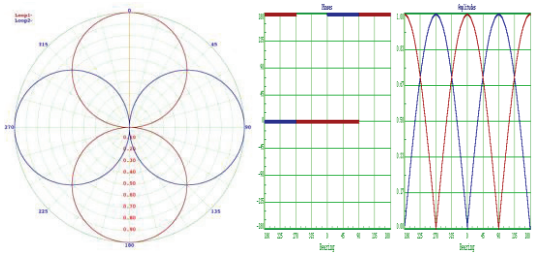


Fig. 3. Ideal pattern plots. Left: Polar representation. Right: Phase and Amplitude plots.

The Auto-APM software outputs pattern data continuously that are organized into daily files, which needs to be averaged over time in order to utilize enough ship echoes to maximize the bearing coverage. In this present study, four averaging windows were used and compared: 15-days, 1-month, 2-months and 3-months.

Since the pattern's mathematical representation is of Complex Nature, the analysis methodology will consist of Amplitude and Phase comparisons. The metrics used are Root Mean Square (RMS), Correlation Coefficients (CI) and Number of Valid Pattern Points.

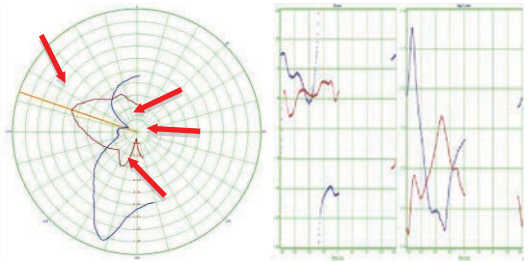


Fig. 4. Espichel Station boat pattern plots. Left: Polar representation, with main characteristics identified with red arrows. Right: Phase and Amplitude plots.

4. DATA ANALYSIS

The results of the data analysis are presented in Figs. 5 and 6. The plots shown on the left column concern amplitude error comparisons, while on the right are the results for phase error comparisons. The plots on the top represent RMS, on the middle CI and on the bottom the Number of Valid Pattern Points. In each plot it is presented the response for each averaging window.

In Figs. 5 and 6 it is possible to identify both pattern change-inducing events (the installation of communications antenna and the vertical whip fault), both in Loops 1 and 2 amplitude plots as an increase of RMS and decrease of CI. Due to its inherent characteristics, phase error comparisons are not as suitable as amplitude in order to understand error-increasing events. An ideal phase plot has two nulls (Fig. 3), related with the bearings that separate the positive from the negative lobes of each loop. A small error in the bearing associated with the two nulls can artificially increase the RMS error and lower the CI, which can lead to unrealistic conclusions.

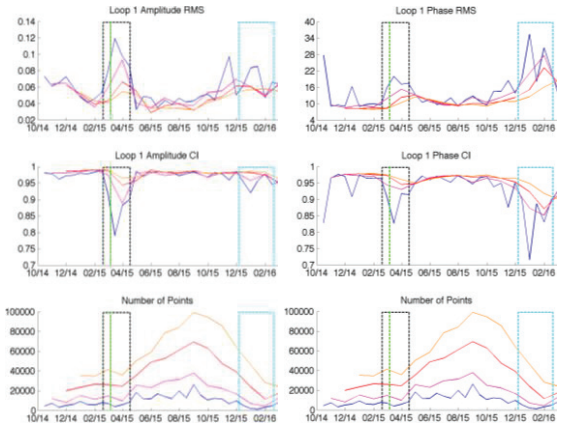


Fig. 5. Loop 1 data comparison plots. Legend: blue - 15 days average; magenta - 1 month average; red - 2 months average; orange - 3 Months Average. Dotted lines representations are similar to Fig. 2.

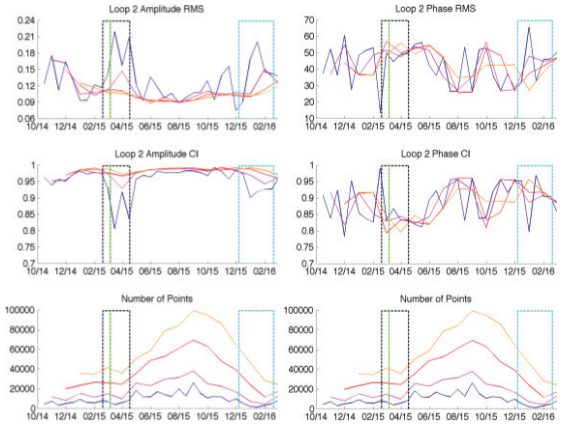


Fig. 6. Loop 2 data comparison plots. Legend: blue - 15 days average; magenta - 1 month average; red - 2 months average; orange - 3 Months Average. Dotted lines representations are similar to Fig. 2.

As expected, a longer averaging span introduces a delay in the results; nevertheless the data is more stable and presents fewer spikes. Also, due to the smoothing produced by the longer averaging spans, the RMS peaks and CI Drops have less amplitude. In this case, the 1-month averaging span represents the best compromise regarding the detection of pattern-changing events, relative to the response-delay and noise sensitivity.

It is also possible to verify a significant increase in the number of valid pattern points during the summer months, which allows a better pattern definition with shorter averaging spans in these months. On the other hand, during winter months the lower amount of points can affect the pattern definition. In general, the choice of parameters and the effectiveness of this method may vary from site to site or even time of year, depending on amount and nature of vessel activity.

4.1. Pattern changes examples: Buoy Communications Antenna Presence

In the Fig. 7 it is presented the Auto-APM and boat patterns without and with the presence of the Buoy Communications Antenna. The distortion caused by the presence of this antenna is noticeable in both loops, which was also detected with the RMS and CI plots (Figs 5 and 6).

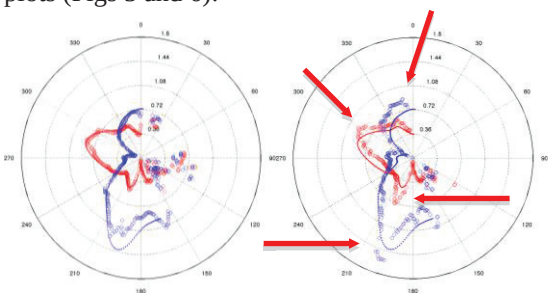


Fig. 7 - Loop patterns without and with the presence of the Buoy Communications Antenna. Legend: red - Loop 1; blue - Loop 2; continuous line - boat pattern; circles - Auto-APM pattern.

4.2. Pattern changes: Antenna Vertical Whip Fault

In the Fig. 8 it is presented the Auto-APM and boat patterns before and after the antenna whip fault. The distortion caused by this fault is specially seen in Loop 2, as it can be seen with the previous results.

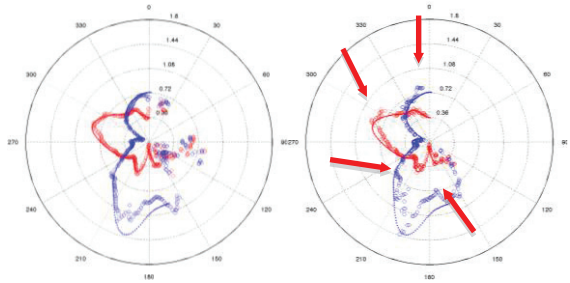


Fig. 8. Loop patterns before and after antenna whip fault. Legend: red - Loop 1; blue - Loop 2; continuous line - boat pattern; circles - Auto-APM pattern.

4.3. Number of Valid Pattern Points

In the Fig. 9 it is shown the AIS echoes corresponding to valid pattern points in winter and summer conditions, in which is clearly visible the increased point density during the summer.

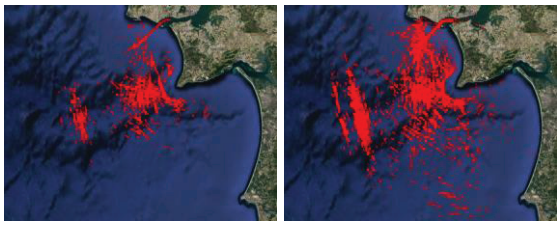


Fig. 9. AIS-obtained echoes corresponding to valid pattern points in winter (Left - March 2015) and summer (Right - August 2015) situations (1 month averaging span).

5. CONCLUSIONS

From the results shown in point 4, it is possible to conclude that the Auto-APM system can, in fact, detect Antenna Pattern changes, both when these are due to environmental causes or due to hardware faults, which was the first objective of this study.

Regarding the second objective, it was possible to conclude that the pattern error phase response is less suitable for RMS and CI comparisons than the amplitude, due to the nulls in its characteristic

response. The pattern error amplitude response was able to detect both pattern-changing events with increasing RMS and decreasing CI. The overall amplitude and delay of these changes are related with the length of the averaging span. With 1-month averaging it was possible to obtain better-defined patterns with less overall noise, comparing with lower averaging spans, without adding a significant delay in the event detection. With greater averaging the response is slower, and the overall amplitude of the error is also smaller, which would be an issue regarding the development of automatic detection algorithms with these metrics. Also, the variability of the number of valid pattern points according with the season justifies that the choice of the averaging span is not on the smallest interval studied. During winter the number of points drops, which can affect the pattern representativity (poor bearing definition) for shorter averaging spans.

When comparing Auto-APM and boat patterns, even in non-error situations, it is possible to verify a good alignment of both patterns except towards the Southern bearings. This can be explained with the higher land distance that these signals have to travel before reaching the antenna, suffering from a greater attenuation than from other bearings. It is then considered a feature of the site coastline morphology and not a system malfunction. If a significant change is detected, the new Auto-APM pattern shall be considered valid and not the boat pattern.

One interesting fact which also validates the Auto-APM and the proposed analysis methodology is that the Antenna whip fault event was visible in the RMS and CI Amplitude error responses before it manifested itself with the power changes (Fig. 5 and 6).

The new Auto-APM feature is of great use for all SeaSonde stations since it enhances data quality. This is achieved by reducing bearing error and allowing an early detection of antenna pattern changes, two of the most important, but not always well-resolved issues when operating HF Radars, without increasing the operation cost.

ACKNOWLEDGEMENTS

The presented study was possible due to a collaboration agreement between QUALITAS REMOS / CODAR and the IH.

REFERENCES

Paduan, J. D., K. Cheol Kim, M. S. Cook, and F. P. Chavez (2006). Calibration and Validation of Direction-Finding High-Frequency Radar Ocean Surface Current Observations. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 31, 862-875.

Flores-Vidal, X., Flament, P., Durazo, R., Chavanne, C., Gurgel, K.-W. (2012). High-Frequency Radars: Beamforming Calibrations Using Ships as Reflectors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 30, 638-648.

Evans, C., H. Roarty, E. Handel, and S. Glenn (2015). Evaluation of Three Antenna Pattern Measurements for a 25 MHz SeaSonde. *Proceedings of the CWTMIEEE/OES Conference*, St. Petersburg.

Emery, B., Washburn, L., Whelan, C., Barrick, D. and Harlam, J. (2014). Measuring Antenna Patterns for Ocean Surface Current HF Radars with Ships of Opportunity. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 31, 1564-1582.

Bares 2.0 wave buoy and sustainable buoy network

P. González (1), X. Fernández (2)

(1) Grupo de Procesado de Imagen, Escuela de Ingeniería de Telecomunicación, Campus Universitario Lagoas-Marcosende, 36310 VIGO (Pontevedra). pablooogonz@gmail.com.

(2) Grupo de Procesado de Imagen, Escuela de Ingeniería de Telecomunicación, Campus Universitario Lagoas-Marcosende, 36310 VIGO (Pontevedra).

Abstract: The aim of this article is to show the operation of the Bares 2.0 wave buoy and the Bares network developed by HCTech. In the marine sector is highly important to know the state of the sea for applications such as construction of ports, study of the impact of waves in coastal areas, development and calibration of forecasting wave models, knowledge of the state of the maritime navigation channels, etc. The great difficulty that exists in order to obtain the information of ocean waves is the high cost of the buoys, installation and maintenance. The Bares network aims to cover areas of high oceanographic interest, the target is a sustainable network of buoys that facilitate the access to wave data. The features of this network are the optimized cost, high reliability and reduced maintenance.

Key words: buoy, waves, network, Bares, oceanography, comparative.

1. INTRODUCTION

The Bares 2.0 wave buoy and the Bares network allow to analyze the behavior of the sea at an optimal cost, with high precision and high robustness in order to obtain long temporal series with high quality.

In the following sections we explain the most important aspects of hardware and software, we talk about the Bares network project and finally we will see a brief comparative of the Bares 1.0 and 2.0 with the Triaxys and the Datawell.

2. HARDWARE AND SOFTWARE

2.1. Energy module

The buoy includes three rechargeable batteries and four solar panels, this elements provide an autonomous operation for a long time. Thanks to the optimal consumption of electronics it is possible to guarantee the operation in adverse conditions, that is, with very low solar energy. This buoy has different states of operation, if the available energy is too low the buoy works in a low consumption state in order to guarantee the operation of the system.

2.2. IMU/AHRS

The buoy has a cutting-edge and cost effective IMU/AHRS (Inertial Measurement Unit/Attitude Heading Reference System) based in MEMS (Micro Electro Mechanical System) technology. This unit has a three axis accelerometer, three axis gyroscope, three axis magnetometer and temperature sensors. The most relevant characteristics of the IMU/AHRS are:

- MEMS sensors of high linearity and low noise.
- Sensors calibrated and tested in the range of -40 to 85 ° C.
- Efficient microprocessor running the Kalman (Kalman, 1960) algorithm at 1KHz. This algorithm implements the sensor fusion and rejects spurious vibrations.
- 0.2º pitch and roll accuracy.
- 0.8º heading accuracy.
- Very low consumption.

2.3. Control module

This module controls, synchronizes and monitors all subsystems in the buoy. For guarantee a robust and efficient operation, we made a great effort in the software and hardware development.

The control module software is based on state machine concept, the most relevant characteristics are:

- Automatically adjust the operation mode in function of battery charge. If it is too low for the transmission and/or for the processing, the software stores raw data and only processes and/or transmits when the battery charge has the correct level.
- In the case of critical errors in the processing and communication module the system stores the raw data. Thus raw data can be recovered and processed later.

- A solid state memory to store the raw data for more than two years.
- In case of critical errors as errors of the IMU/AHRS the system will send alert messages to the servers.
- In case of GPS errors due to malfunction or that the buoy is drifting the system will send alert messages to servers.

2.4. Processing and communication module

This element performs the onboard processing of raw data and manages the communications with the Bares servers. The more relevant characteristics are:

- Powerful and efficient Arm microprocessor that runs the C++ applications.
- GPRS/3G modem. Due to modular design it is also possible to use other interface type as satellite communication.
- The integration of the communication module in the Bares 2.0 sensor allows increase energy efficiency and reliability.
- A solid state memory allowing to store the processed data for more than two years. This memory is independent of control module memory and allows to store the processed data when the communication interface is broken or when there are not enough battery for transmit the processed data.
- Wave processing software completely developed by HCTech. This software was validated comparing our buoy with Triaxys and Datawell.
- Communication software completely developed by HCTech. This software is highly reliable and efficient and is based on the AMQP protocol that guarantees the integrity and the confidentiality of the data in the transmission toward our servers.

The wave processing software is an improvement of the Bares 1.0 software. Initially the software was developed in Matlab platform. In order to validate the correct operation of the mathematical model we develop a wave simulator based on Simulink. Later was installed a wave buoy with the Bares 1.0 sensor and the Triaxys sensor for compare both. This comparison showed us that the Bares 1.0 was comparable to the Triaxys with the advantage that the cost of the Bares 1.0 is much lower. However we saw that was necessary improve the IMU/AHRS for directional wave analysis because the inertial unit of the first version was not enough accurate. For this reason Bares 2.0 includes a cutting-edge IMU/AHRS but with an effective cost. Finally all wave processing software was implemented in C++.

Generally, the operating of the software is the following:

1. Raw data checking.
2. Transformation of accelerations in to a fixed coordinate system.
3. Digital integration and high pass filtering of the accelerations in order to obtain velocities and displacements (Sangbo, 2002).
4. Non directional processing (Earle, 1996): statistical-temporal processing and spectral processing of vertical displacement.
5. Directional processing (Benoit *et al.*, 1997) (Earle, 1996): spectral processing of vertical and horizontal displacements.

The communication software implements a very advanced protocol between the buoy and the servers. This software is based on AMQP (O'Hara, 2007) protocol which allows to send a very high quantity of messages, always ensuring the integrity and the confidentiality of the data. The main advantages of this protocol are:

- Message-oriented protocol.
- Redundancy and availability. If the application of the server fails on processing the messages, these are not lost because the protocol insists until they are fully processed.
- Asynchronous communication that allows to process the messages one by one or for groups.
- Delivery guarantee of messages in the order in that they were sent.
- Scalability.
- Multicasting between the server and the buoys with the possibility of actualizations of the wave processing software.
- Remote configuration of the buoys.

3. THE BARES NETWORK

Knowledge of the sea state is highly important for applications such as port construction, study of wave impact in coastal areas, development and calibration of forecasting wave models, knowledge of the state of the marine navigation channels, recreational navigation, aquatic sports, study of the climate change, etc.

At present is difficult to obtain quality ocean wave data because the buoys are expensive and difficult to install and to maintain. This implies that the number of ocean wave buoys is small and is very frequent to install only one wave buoy in order to cover an extensive marine area.

The Bares network aims to contribute to reduce these lacks in the oceanographic physics. The main objective is to promote in the creation of stable and sustainable coastal wave buoy network that allow to increase the number of sample points. In fact this is the principal philosophy of the project, increase the number of sample points that provides the next advantages:

- Allow to increase the accuracy in the characterization of ocean waves and improve the forecasting models.
- Allows to guarantee the wave data of the marine area because there are not a single point of failure.
- Allows to install wave buoys near the coastal area. Thus it is possible to study in great detail the waves affected by the underwater topography.

This is possible because the Bares 2.0 is a cost effective buoy with low maintenance requirements and highly robust.

HCTech will contribute to generate the wave buoy network in places where interest for the ocean wave data is high. Interested entities will be able to access the data contractually. Betting for this sustainable solution, you do not need to make large investments for buying buoys and neither no need to worry about maintenance.

4. COMPARATIVE

The next figures show real data from the Bares, the Triaxys and the Datawell. Figures 1, 3 and 5 are comparative plots, upper subplots show the Bares signal under the other and lower subplots show the Bares signal above the other. Figures 2, 4 and 6 shows scatter plots.

In figures 1 and 2 can be seen the average wave period of the Bares 1.0 and the Triaxys, both sensors in the same buoy during two months. Figures 3 and 4 show the significant wave height of the Bares 1.0 and the Datawelll, in this case sensors were placed in different buoys at a distance of 5km during two months. In the last figures can be seen the mean wave direction of the Bares 2.0 and the Datawell software.

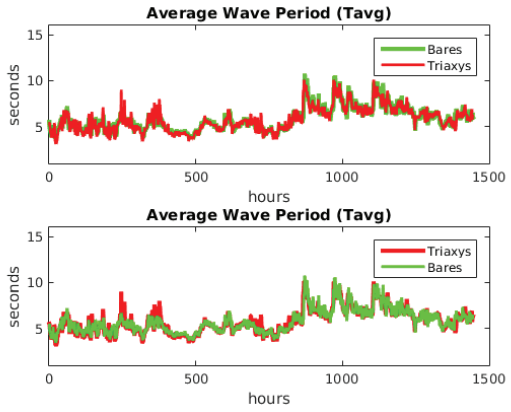


Fig. 1. Average wave period. Bares 1.0 vs Triaxys in the same buoy.

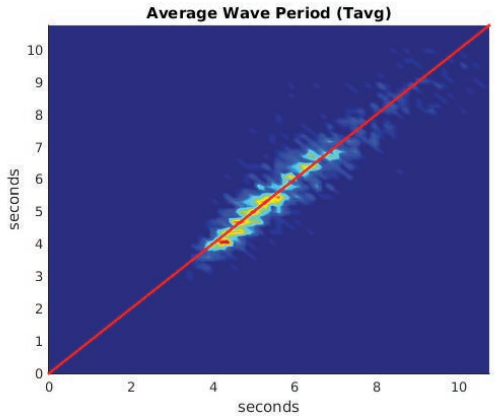


Fig. 2. Scatter plot of average wave period. Bares 1.0 vs Triaxys in the same buoy.

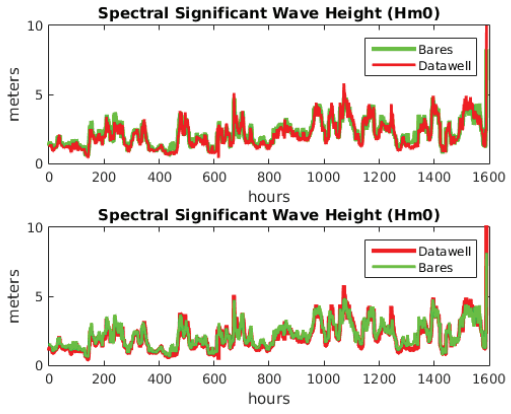


Fig. 3. Significant wave height (spectral). Bares 1.0 vs Datawell in different buoys at a distance of 5km.

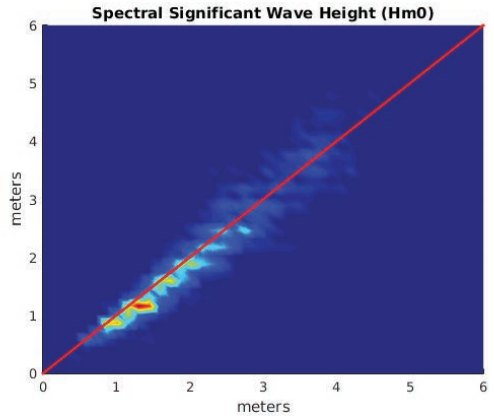


Fig. 4. Scatter plot of significant wave height (spectral). Bares 1.0 vs Datawell in different buoys at a distance of 5km.

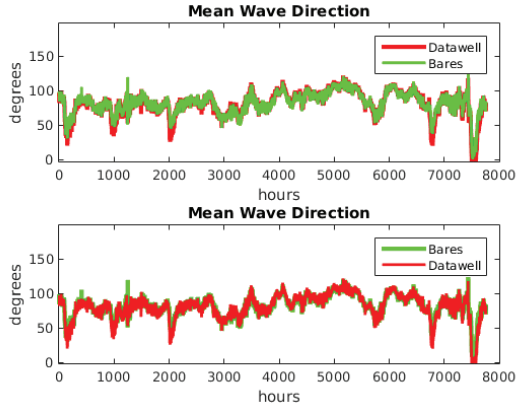


Fig. 5. Mean wave direction. Bares 2.0 vs Datawell directional algorithm.

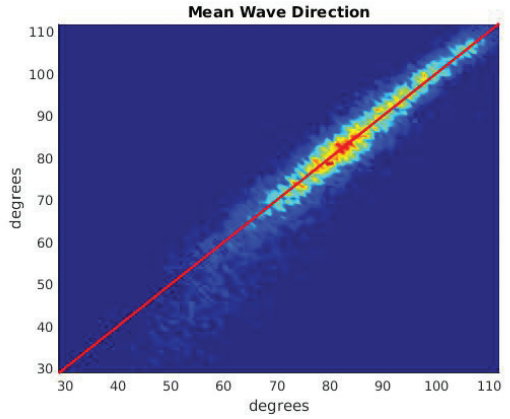


Fig. 6. Scatter plot of mean wave direction. Bares 2.0 vs Datawell directional algorithm.

5. CONCLUSIONS

In the previous section can be seen the good operation of the Bares wave sensor and the Bares wave buoy. Figures 1, 3 and 5 show the high similarity between the Bares and the reference sensors. In the scatter plots (figures 2, 4 and 6) you can see the high correlation of the sensors. These results and the characteristics of the wave buoy allow us to guarantee that the Bares 2.0 will contribute to create a permanent and sustainable buoy network that will provide high quality wave data.

6. REFERENCES

Benoit, M., Frigaard. P., e Schaffer, H. (1997). Analysing multidirectional wave spectra: A tentative classification of available methods. *Proc IAHR Sem Multidirectional Waves Interact Struct*, 131-158.

Earle, M. (1996). NDBC Nondirectional and Directional Wave Data Analysis Procedures. *NDBC Technical Document 96-01*, 43pp

Kalman, R. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Transactions of the ASME. *Journal of Basic Engineering, 82*, 35-45

O'Hara, J. (2007). Toward a commodity enterprise middleware. *ACM*, 5, 48-55.

Sangbo, H., Chung, J. (2002). Retrieving displacement signal from measured acceleration signal. *Proceedings of the 20th IMAC*.

Video imagery technique for wave celerity estimation: results on rocky-shore platform

U. Andriolo (1), A. Azevedo (2), A.M., Nobre Silva (1), R. Taborda (1) and C. Lira (1)

(1) Instituto Dom Luiz, Faculty of Sciences, University of Lisbon, Lisbon, Portugal. uandriolo@fc.ul.pt.

(2) LNEC, National Laboratory of Engineering, Lisbon, Portugal.

Abstract: Video monitoring is a useful tool for monitoring hydrodynamics in the coastal zone.This work presents a new method to derive wave celerity in the nearshore zone. Timestack images were produced from image sequences acquired at Magoito beach, on Portuguese west coast. Shoaling and breaking wave celerity was derived by a pattern recognition technique. Results were compared with celerity obtained by numerical and empirical modelling for a reference profile. Overall, the video-derived celerity profile showed best agreement with the shallow water linear wave theory.

Key words: timestack image, shallow water, wave characterization, image processing.

1. INTRODUCTION

In the coastal zone, close-range video remote sensing techniques have been widely used since the pioneering work of Lippmann & Holman (1989). Optical systems have been providing crucial information to coastal engineers and scientists on littoral hydro- and morpho-dynamics.

Timestack images are specific optical products generated by sampling cross-shore pixel intensity on time series of image sequences. Such space-time images can be used to estimate wave propagation speed (Yoo, 2007; Catalan & Haller, 2008; Almar *et al.*, 2012).

This work presents a new method to estimate wave celerity by coastal imagery. Video-derived wave celerity is compared against existing empirical formulations and modelling results at a reference nearshore profile.

2. STUDY AREA AND CAMERA SET-UP

Magoito beach is located on the Portuguese west coast (Fig. 1). It extends for about 800 m, is limited northward by a headland and landward by a 25-meter-high cliff. The sandy beach develops over a rocky platform and exhibits a variable thickness that depends on the seasonality. This coast stretch is characterized by mesotidal semi-diurnal tides with spring tide amplitude ranging between 2.1 m to 3.6 m (Antunes, 2013). Offshore wave regime is dominated by high energy swells (Ferreira & Matias, 2013) with an average annual significant wave height H_s = 2 m and peak period T_P = 10.5 s, approaching from *NNW* (Andrade *et al.*, 2013).

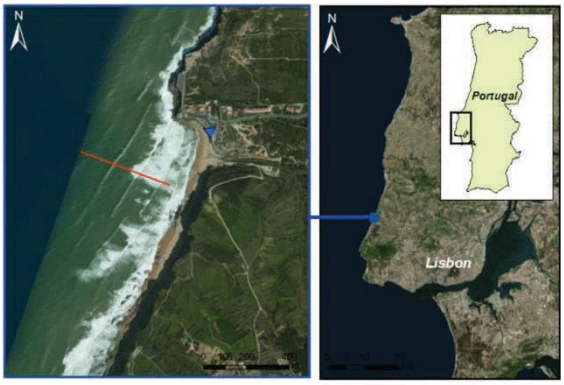


Fig. 1. Map of the study site location. The red line identifies the reference profile and the blue triangle the camera position. (Base map source: ESRI imagery).

On 6th of May 2015, a video camera model Mobotix M12 was temporary installed, looking at the nearshore area. The camera was placed around 13 m above the Mean Sea Level (MSL) (Fig. 2, above). The images, with 1280x960 pixel resolution (Fig. 2, below), were collected at a frequency of *1 Hz* between 09:40 and 12:10 UTC time, continuously.

During the monitored interval, the tide level measured at Cascais tide gauge varied between -1.1m and 0 m. Offshore waves characteristics were retrieved from Leixões buoy data, located around 250 km northern of the study area. *In situ* instrumentation measured a significant wave height H_s = 3m, peak period T_p=11.5 s and wave direction of 315º.



Fig. 2. Video system deployed (above) and an example of a snapshot acquired by the camera (below). Red line indicates the cross-shore transect considered for timestack production and wave celerity computation.

3. METHODS

This section illustrates the methods for 1) rectifying the video images and producing timestacks; 2) estimating wave celerity by wave pattern recognition on timestack images; 3) modelling wave celerity over the reference profile for video-derived data validation.

3.1. Image pre-processing

Images acquired by the video systems were corrected for lens-induced distortions following the procedure of Bouguet (2007). Ground Control Points (GCP) were surveyed by GPS-RTK on the subaerial part of the beach during the field experiment. GCP coordinates were used to obtain the external camera orientations, applying the method described in Taborda & Silva (2012). Rectification process was performed following the standard collinearity conditions, which transform the image coordinates to world coordinates.

Timestack images were produced by sampling a pixel array over the rectified image sequence across the reference transect (Fig. 2, below, and Fig. 3) using a specific Matlab algorithm (Almar *et al.*, 2012).

3.2. Timestack image processing

A 450-meter-long cross-shore transect was chosen to study wave celerity in the nearshore zone. The shoreward limit distances around 90 m from the shoreline. Profile rocky-bottom height was retrieved by 2011 LiDAR dataset (provided by Direção Geral do Território - DGT; Silva *et al.*, 2012).

A total of 16 timestacks were created over the whole video footage, each one representing 10 minutes time interval (Fig. 3). On these images, pixel intensity values can be related to water elevation due to the incident light reflection on the water surface. When waves are shoaling, the slope of the surface changes rapidly inducing an abrupt pixel brightness decrease in the timestack (e.g., Catalan & Haller, 2008). Breaking waves are, instead, identified by pixel intensity increases, as the breaking waves white crests are clearly reflected by the sun light (e.g., Aarninkhof, 2003; Yoo, 2007). Following these assumptions, darker pixel intensity patterns represent shoaling waves propagating shoreward in the nearshore zone, whereas breaking waves towards the shoreline are identified by highest intensity pixels. Image intensity standard deviation was used to spot averaged wave breaking point (Almar *et al.*, 2012) over the 2 hours and 30 minutes, in order to discriminate shoaling and breaking zones.

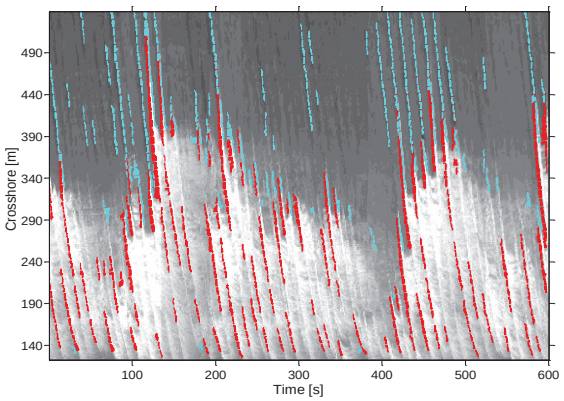


Fig. 3. Example of a timestack image of Magoito. Cyan lines indicate the detected darkest pixels representing shoaling waves; red lines indicate breaking waves.

An image processing algorithm was built in order to extract the lines observed in the timestack images, which correspond to shoaling and breaking waves (Fig. 3). The algorithm: i) applies several intensity corrections to the Red Band to enhance the contrast between the lines; ii) the shoaling waves (dark lines) are separated from the breaking waves (bright lines) in two distinct sets; iii) a Sobel filter is applied to each set, and finally; iv) the line extraction and labelling is performed. The algorithm was developed with open-source software (Python and OpenCV).

3.3. Wave celerity estimation

Wave celerity across the profile was estimated by derivations of the extracted lines. In the timestack images, the derivative in time of the detected space-time lines represents the wave instantaneous velocity at each point. The method was applied separately for shoaling and breaking wave patterns.

Data analysis averaged all computed celerity values. Spatial smoothing was applied using a running

average, with a 60 pixel-size window, over the profile. The celerity profile for the monitored interval was obtained processing the 16 timestacks and averaging the results.

3.4. Wave celerity modelling

Numerical models of wave celerity were computed for comparison with the values obtained by the aforementioned technique.

The wave characteristics were modelled within ArcGIS using the BeachMM tool (Silva & Taborda, 2012) which interfaces SWAN (Booij *et al.*, 1999) and XBeach (Roelvink *et al.*, 2009) models. The SWAN model run in stationary mode, accounted for bottom friction using Madsen *et al.*'s (1988) method with roughness parameter of 0.05 m and did not considered wind-related processes. XBeach wave propagation simulations were performed for the time interval of the field campaign (9600 s with a time step interval of 2400 s) and included the tidal variation. Wave breaking criteria followed Roelvink (1993), with breaker parameter of 0.6 and dissipation coefficient of 1.

Empirical formulations for wave celerity estimation included linear wave theory:

$$c = \frac{g}{k}\tanh(kh) \quad (1)$$

where g is the gravitational acceleration, k is the wavenumber and h the water depth. The shallow water approximation of equation 1 is given by:

$$c = \sqrt{gh} \quad (2)$$

Non-linear wave theories were also considered, solitary wave:

$$c = \sqrt{gh(1 + H/h)} \quad (3)$$

and the formulation proposed by Booij (1981):

$$c^2 = g/k\ tanh\,(k(h + H/2)) \quad (4)$$

where H is the local wave height.

Local wave height H and wave number k for computing Eq. 3 and Eq. 4 were derived by the hydrodynamic simulation of SWAN/XBeach. Water depth h was tide-corrected for each model computation.

4. RESULTS

4.1. Image rectification

In total, 722 celerity values were considered for celerity profile computation, 370 for breaking and 352 for shoaling waves. These numbers do not represent a total amount of waves, but the number of lines detected by the image processing algorithm.

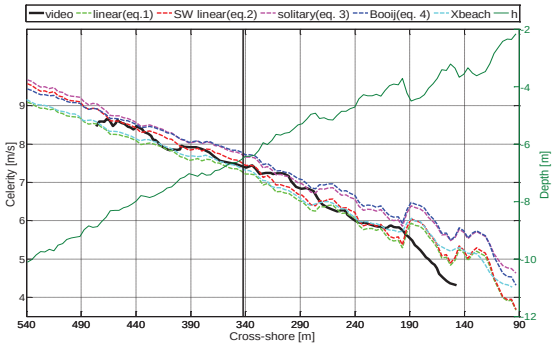


Fig. 4. Comparison between modelled and observed time-averaged wave celerity. Video-derived celerity is solid black profile, dashed lines are modelled wave celerity. Cross-shore values on x axis represent distance from the shoreline. Topographic depth is shown on right y axis. Vertical black dashed line is median location of starting breaking point over the monitored time.

Fig. 4 shows the variation of wave celerity along the cross-shore profile derived by proposed methodology. The video-derived results do not extent over the entire profile due to the size of moving average window. Video-estimated celerity decreased regularly from 9 m/s, at x=480 m, to around 6 m/s, at x=180 m. Average trend decreased about 1 m/s every 100 m. Wave celerity results were bounded by Booij's (Eq. 4) and linear (Eq. 1) models, suggesting the adequacy of the proposed technique. From x=180 m to about x=140 m, computed celerity decreased from around 6 to 4 m/s.

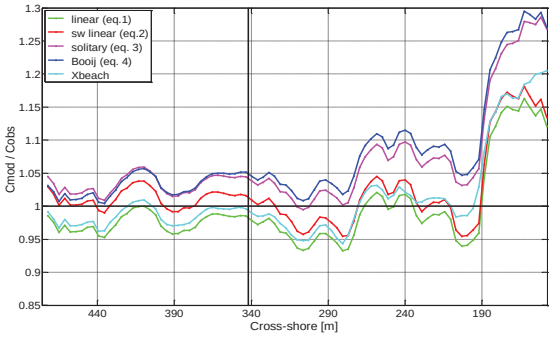


Fig. 5. Ratio between modelled and observed speeds, Cm/Cobs. Horizontal solid black line at y=1 indicates ideal matching between modelled and observed celerity. Cross-shore values on x axis represent distance from the shoreline. Vertical dashed black line is median location of start breaking point.

The ratio between the results estimated from video and modelled celerity computed between x=480 m and x=150 m is shown in Fig. 5. The video-derived celerity showed good agreement with all tested models. The ratio for all formulations stayed between 1.05 and 0.95 in the shoaling zone up to around 280 m in the surf zone. Towards the shore, video results presented a better match with linear wave theory (including swallow water approximation) up to about 190 m. Disparities between modelled and video-derived celerity were larger at the shoreward end of the profile. This misfit can be attributed to the limitation of the method due

to edge effects and to the local bathymetry irregularity.

5. CONCLUSIONS

This study demonstrates the usefulness of video derived timestack images in coastal morphodynamics studies. Wave celerity, derived over a nearshore profile, showed agreement with linear wave theory. Further investigations are still needed, in particular to set the ideal parameters for image processing.

Acknowledgment

Umberto Andriolo was supported by the EARTHSYSTEM Doctorate Programme led by Institute Dom Luiz Associate Laboratory at the University of Lisbon (SFRH/BD/52558/2014). The authors gratefully acknowledge T. Silveira for her contributions during fieldwork. We are also in debt to R. Almar for the timestack production code.

REFERENCES

Aarninkhof, S.G.J., 2003. Nearshore bathymetry derived from video imagery. *Ph.D thesis*. Delft University. 175pp.

Almar, R., Cienfuegos, R., Catalán, P.A., Michallet, H., Castelle, B. Bonneton, P., Marieu, V., 2012. A new breaking wave height direct estimator from video imagery. *Coastal Engineering*, 61, 42-48.

Andrade, C., Taborda, R., Oliveira, A.M., Alves, M., Carapuço, AM. (2013). Estudo do litoral na área de intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo. Caracterização do clima de agitação ao largo. Relatório Técnico., Lisboa, 40 p.

Antunes, C., 2013. Estudo do litoral na área de intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo. Caracterização do regime de marés. *Relatório Técnico*., Lisboa, 18 p. (in Portuguese).

Booij, N., 1981. Gravity waves on water with non-uniform depth and current. Technical Report. No.81-1. Dept. Civ. Eng. Delft University of Technology.

Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen. 1999. A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *Journal of Geophysical Resources*, 104, C4, 7649-7666.

Bouguet J-Y., 2007. Camera Calibration Toolbox www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/. Accessed March 2016.

Catalán, P. and Haller, M., 2008. Remote sensing of breaking wave phase speeds with application to nonlinear depth inversion, *Coastal Engineering*, 55, 93-111.

Ferreira, O. & Matias, A., 2013. Portugal. In: Coastal Erosion and Protection in Europe, Williams, A. and Pranzini, E. (Ed), Routledge, 457pp, doi:10.4324/9780203128558.

Lippmann, T.C. and Holman R.A., 1989. Quantification of sand bar morphology: A video technique based on wave dissipation. *Journal of Geophysical Research*, 94 (C1), 995-1011, 1989.

Madsen, 0. S., Y.-K. Poon, and H. C. Graber. 1988. Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory. *Proceedings. 21st Coastal Engineering Conf., ASCE.*

Oliveira, L., 2009. Estudo Morfodinâmico e Sedimentar das praias do concelho de Sintra. *Master thesis*. Faculty of Science, Unoversity of Lisbon. 148pp.

Roelvink, J.A. 1993. Dissipation in random wave groups incident on a beach. *Coastal Engineering*, 19, 127-150.

Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., Lescinsky, J. and McCall, R., 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, vol. 56, 1133-1152.

Silva, M., Patrício, P., Mariano, A., Morais, M. e Valério, M. 2012. Obtenção de Dados LiDAR para as Zonas Costeiras de Portugal Continental. *2.as Jornadas de Engenharia Hidrográfica* – 20-22 de Junho, 19-22p. (in Portuguese).

Silva, A.N., Taborda, R., 2012. Integration of beach hydrodynamic and morphodynamic modelling in a GIS environment. *Journal of Coastal Conservation*, 17, 201-210.

Taborda, R. & Silva, A.N., 2012. COSMOS: A lightweight coastal video monitoring system. *Computers & Geosciences*, 49, 248-255.

Yoo, J. 2007: Nonlinear bathymetry inversion based on wave property estimation from nearshore video imagery. *PhD thesis*, Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, USA.

Economic decision factors in site selection for offshore renewable energy projects

M. Silva (1), J. Cândido (1) e I. Machado (1)

(1) WavEC Offshore Renewables. R. Dom Jerónimo Osório, 11 1ºandar, Lisboa, marta@wavec.org

Abstract: The selection of the most suitable site for the development of an offshore renewable energy project is a fundamental aspect of its planning and can have a significant impact on the overall economic viability. Multi-criteria analysis (MCA) is an often used technique in the site selection of such projects, weighting energy resource and technical and non-technical constraints. Economic feasibility studies are often done in parallel, but separately and only for a limited number of sites.
The implementation of MCA faces a few limitations related with the need to define a set of criteria and the respective distribution of weights which are often based on what experts perceive as the way a given factor impacts on the overall project feasibility. The integration of economic functions will significantly contribute to overcoming such limitations, by defining and weighing criteria based on objective cost assumptions.
In this presentation the impact of economic factors on the process of site selection and their implementation is described.

Key words: site selection, multi-criteria analysis, offshore renewable energy, cost of energy.

1. INTRODUCTION

The siting of offshore renewable energy (ORE) projects is a fundamental aspect of its development, both as maritime spatial planning (MSP) for a country or region, or as a part of the project design phase (Lynch et al., 2012). The selection of the most suitable site is not only dependent on the requisites of ORE projects, but also on the existing activities in the area that may impact its operation or invalidate its construction.

From a MSP point of view, a wide range of stakeholders will be affected and will have different objectives, and as such decision making is a complex process that needs to account for a vast number of parameters. For project developers, the objective function is driven by economic factors such as return on investment or the Levelized Cost of Energy (LCOE).

Multi-criteria analysis (MCA) is an often used valuable technique in site selection, weighting energy resource and technical and non-technical constraints, such as space usage restrictions, potential conflicting activities, proximity to infrastructures, water depth, seabed geology and local extreme metocean conditions.

Allied to site selection are economic feasibility studies to assess the attractiveness of chosen areas in terms of the expected economical return. These studies require detailed information of site characteristics in order to estimate both the costs of the project and the energy output. As a result, these are often performed downstream of the site selection studies, once a restricted few sites have been selected.

While site selection tries to select the most favourable sites for project development, economic factors are rarely used. There may be an implicit association between geophysical characteristics and the expected outcome in economic terms, such as a negative impact for deeper waters, but these are often qualitative. More often than not, the definition of the inputs of the multi-criteria analysis is based not on objective considerations but instead on what experts perceive as the way a given factor impacts on the overall project feasibility.

2. MULTI-CRITERIA ANALYSIS

2.1. Overview

Multi-criteria analysis is a technique used to aid in the decision making process by ranking and/or selecting a set of different options according to different parameters in order to achieve an objective, or a set of objectives. These objectives may be conflicting among themselves, or represent a trade-off system. Multi-criteria analysis allows to break a complex problem into smaller subsets of data (Department for Communities and Local Government, 2009).

The decision process using MCA can be summarized in the following steps:

- Identification of the problem to be solved
- Identification the factors that affect the possible solutions
- Definition of the set of possible options for each factor and determination of the resulting criteria to be used to compare the options.
- Analysis of the choices

The criteria typically result from the definition of relevant functions for each identified decision factor, defined according to the range of possible options and reclassified into a common scale. Each criterion will have an associated weight according to its impact in the overall evaluation.

Reclassification is typically done on a 0-100 scale, with 0 being the least preferable scenario. The relationship between values and reclassification is not always linear or direct (e.g. costs have an inverse relationship, as a costlier option corresponds to a worse scenario). Some criteria may be defined as constraints (e.g. fishing concessions, environmental protected areas, military areas), corresponding to blanked areas in the final suitability map.

Weighting is also often done on a percentage basis, in which the sum of the weights assigned to each criterion amounts to 100%.

Once the reclassification and weighting is concluded, the overall weighted score for each option can be calculated as $\sum_{i=1}^{n} w_i \, s_i$, where w_i is the weight of criterion i and s_i is the reclassification for the same criterion, summed for all n criteria.

The overall weighted score, also called suitability index, can be used to rank all the different options.

The integration of MCA into GIS software packages has proven to be particularly ideal to tackle the spatial nature of site selection decision problems (Jankowski, 1995). GIS-MCA offers the possibility of expeditiously setting out the above mentioned steps for different grid nodes covering the domain with the resolution needed by the end user.

However, MCA has limitations associated with each of the steps of the process. The selection of the criteria options to be used is a fundamental step of the process. The omission of certain criteria may skew the results towards a less than optimal choice. Furthermore, if not all viable options are included, a good solution may be left out.

Another limitation of MCA is that both the reclassification of impact factors and the weighting of criteria are dependent on the sensitivity and experience of the person performing the analysis. Constraint criteria are usually objective, and based on existing legislation or scientific knowledge. Weighting, on the other hand, is based on the perceived impact on the project feasibility, which is subject to error, especially in a sector where little project experience exists.

The reclassification process can also suffer from oversimplifications, by assuming a linear relationship of the criteria and objectives.

2.2. Application

Multi-criteria analysis has been thoroughly used for site selection of renewable energy projects, both on- and offshore (Beels et al., 2008; Ciobanu et al., 2009; Defne et al., 2011; Haaren and Fthenakis, 2011; Lee et al., 2009; Lynch et al., 2012; Malczewski, 2006; Nobre et al., 2009; Wave Energy Centre, 2012; Zubiate et al., 2009). The majority of these did not include costs in the analysis. When included, the costs were assumed constant across all locations and their weights were based on perceived importance.

A similar exercise has been that of mapping the LCOE across a country or region (Castro-Santos et al., 2015; Cavazzi and Dutton, 2016). The first, while mapping an economic indicator, assumed most costs are independent of location. The analysis of (Cavazzi and Dutton, 2016) have included the influence of geophysical criteria on the LCOE.

3. ECONOMIC ASSESSMENT OF OFFSHORE RENEWABLES

Offshore renewable energy projects, not only due to their novelty and high perceived risk, are capital intensive ones. There are many projects that fail to go ahead due to the lack of funds from the project developers, or even when there have been funds and grants in place, further surveys and feasibility studies may invalidate the decisions made during the site selection process (Montaron, 2014).

Ultimately ORE projects have a specific objective for project developers, which is to produce electricity at a low price in order to be sold into the grid and generate revenue. The common indicator used for project feasibility in energy projects is the LCOE, which is comparable to the electricity selling price, and for renewable energy is calculated as follows (OES, 2015):

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^{n} \frac{(Investment_t + O\&M_t + Decommissioning_t)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{n} \frac{AEP_t}{(1+r)^t}}$$

where AEP_t is the electricity production at year t, r is the discount rate[1], n is the duration of the project, that goes from year 0 to year n.

With the previous formula in mind, from an economic point of view a good site will be one that minimizes the costs and maximizes the energy output. However, locations with higher energy resource level usually have higher associated costs.

4. SITE SELECTION USING ECONOMIC CRITERIA

4.1. Criteria

While a large percentage of the costs of ORE projects are related to the devices (OES, 2015), the station keeping system and electrical infrastructure will have an impact on the overall costs as will the

[1] The discount rate is a measure of time-value, which is the price put on the time that an investor waits for a return on an investment.

associated installation costs (OES, 2015; Silva et al., 2015a). The cost of devices is unlikely to change due to changes in geophysical characteristics, and the cost associated with intra-array networks may change due to layout changes (Silva et al., 2015b), but these are expected to be very small, so the ORE farms can be treated as a black box. The costs that are dependent on location characteristics are then associated with the export cable, the moorings or foundations system, and the installation and O&M logistic operations.

The costs associated with these systems are dependent on the following criteria:

- Farm capacity
- Distance to point of electrical grid connection
- Seabed geology
- Water depth
- Distance to port
- Vessel type required for installation and O&M

Of these, farm capacity and vessel type are expected to remain constant for the site selection exercise.

The expected energy output of an area can be calculated from the mapping of the available resource. Offshore renewables are expected to have a capacity factor in the range of 30-40%, i.e. offshore renewables are expected to convert between 30 to 40% of the available energy into electricity.

It is important to also include an availability figure when estimating energy yield. Values between 80 and 90% are expected. Higher distances to port will also have a negative impact on availability as a result of extended time required for maintenance actions.

4.2. Economic functions

In the most simplified approach, moorings' cost varies linearly with the water depth (Fig. 1). However, it is expected that for deeper waters the costs will increase due to an increase in the diameter of the chains or ropes.

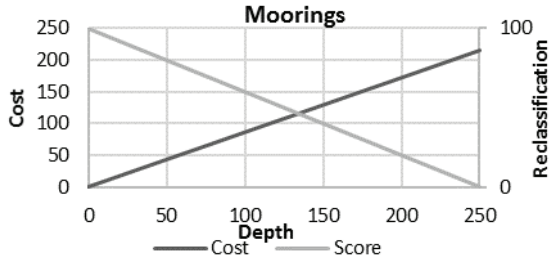


Fig. 1: Variation of moorings' costs, and related reclassification.

Fixed foundations, however, follow a quadratic function with depth (Fig. 2), according to (Cavazzi and Dutton, 2016). This is the reason why fixed offshore wind is restricted to shallow sites, with floating solutions rising as the viable option for water depths above 60m.

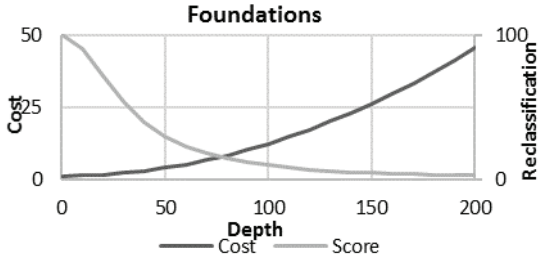


Fig. 2: Variation of foundation costs, and related reclassification.

Like the moorings, the cost of electrical connection also has a linear variation. However, for large distances and large farms there are limitations on the cables that can be used. A way to circumvent this is to include a substation, with added cost, or to use more cables (Curvers and Pierik, 2010).

The installation of electrical cables, anchors and fixed foundations is very dependent on the seabed geology. The associated costs for installation will have a modifier for seabed geology, presented in the table below, which are used by multiplying them by the cost of installation.

Table I: Cost modifiers for seabed geology.

Seabed type	Cost modifier
Sand	1
Mud	3
Gravel	3
Rock	10

Installation costs behave differently from the other costs presented, as they are tiered (Fig. 3). Vessels are charted on day-rate basis, and so the cost will depend on the number of days the vessel is needed. For sea operations it is fundamental that there are weather conditions favourable to conducting the necessary works for the entire duration of the operation. Waiting periods for which the vessel is being charged but not in operation due to bad weather typically occur. This waiting period is dependent on the type of operation, its duration, and the time needed for transit to the location. This is also valid for O&M, which is similar to installation operations.

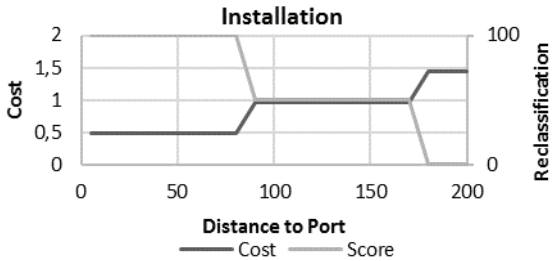


Fig. 3. Variation of installation costs, and related reclassification.

4.3. Scoring and Weighting

Although the reclassification for the cost criteria has been presented in the previous section, cost assumptions can equally be used when devising the distribution of the weighting factors, providing a comparable scale with the same units. Instead of weighting the economic factors against the energy

resource, the suitability index can be calculated by summing all the associated costs and dividing it by the relevant energy production:

$$I_{Suitability} = (cost_{moorings} + cost_{cable} + cost_{inst_moorings} + cost_{inst_device}) + (cost_{inst_cable} + cost_{inst_anchor} + cost_{inst_foundation}) \times seabed_modifier) / AEP$$

This index can then be used to compare the economic component to other non-economic criteria, such as environmental and social impact.

Nevertheless, the costs of each project component can be weighted separately, according to the importance relatively to other criteria and the expected contribution for the economic feasibility of the project.

5. CONCLUSIONS

While already a standard technique used it the site selection of ORE projects, multi-criteria analysis still has several limitations when it comes to the definition of the basic setups and the inclusion of economic factors. In fact, the reclassifications used in the different criteria and the distribution of weights are often defined based on perceived impact on economics and not on objective data.

This paper presented a methodology to include the economics of ORE projects in the site selection process using objective functions. These are not a substitute to project feasibility studies, but will no doubt more accurately inform decision-makers on the economic viability and overall suitability of a wide set of locations.

REFERENCES

Beels, C., Meirschaert, V., Ydens, I., Mathys, P., Rouck, J., Backer, G., and Victor, L. (2008). The Impact of Several Criteria on Site Selection for Wave Energy Conversion in the North Sea. 1–10.

Castro-Santos, L., Garcia, G.P., Estanqueiro, A., and Justino, P. (2015). The Levelized Cost of Energy (LCOE) of wave energy using GIS based analysis: The case study of Portugal. Int. J. Electr. Power Energy Syst. *65*, 21–25.

Cavazzi, S., and Dutton, A.G. (2016). An Offshore Wind Energy Geographic Information System (OWE-GIS) for assessment of the UK's offshore wind energy potential. Renew. Energy *87*, *Part 1*, 212–228.

Ciobanu, A., Aldea, A., Lipară, C., and Băncescu, M. (2009). The Utility of Multicriterial Methods in Valuation of Investments in Exploitation of Renewable Energy Sources (RES). In Ecological Performance in a Competitive Economy, (Bucharest), p. 45.

Curvers, A., and Pierik, J. (2010). Technologies state of the art : Grid integration aspects (ORECCA Coordinated Action Project).

Defne, Z., Haas, K.A., and Fritz, H.M. (2011). GIS based multi-criteria assessment of tidal stream power potential: A case study for Georgia, USA. Renew. Sustain. Energy Rev. *15*, 2310–2321.

Department for Communities and Local Government (2009). Multi-criteria analysis a manual. (Wetherby: Communities and Local Government).

Haaren, R. van, and Fthenakis, V. (2011). GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis (SMCA): Evaluating the case for New York State. Renew. Sustain. Energy Rev. *15*, 3332–3340.

Jankowski, P. (1995). Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. Int. J. Geogr. Inf. Syst. *9*, 251–273.

Lee, A., Chen, H., and Kang, H. (2009). Multi-criteria decision making on strategic selection of wind farms. Renew. Energy *34*, 120–126.

Lynch, K., Murphy, J., Serri, L., and Airoldi, D. (2012). Site Selection Methodology for combined wind and ocean energy technologies in Europe. In 4th International Conference on Ocean Energy, p.

Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. Int. J. Geogr. Inf. Sci. *20*, 703–726.

Montaron, T. (2014). Reedsport OPT Wave Park Plans Terminated.

Nobre, A., Pacheco, M., Jorge, R., Lopes, M., and Gato, L. (2009). Geo-spatial multi-criteria analysis for wave energy conversion system deployment. Renew. Energy *34*, 97–111.

OES (2015). International Levelised Cost of Energy for Ocean Energy Technologies (Ocean Energy Systems - International Energy Agency).

Silva, M., Raventos, A., Teillant, B., Ferri, F., Roc, T., Minns, N., Chartrand, C., Roberts, J., and Filipot, J.-F. (2015a). Algorithms providing effects of array changes on economics (DTOcean).

Silva, M., Weller, S., Lejart, M., Charbonier, K., and Collin, A. (2015b). Prediction of reliability and economics of the offshore electrical infrastructure with recommendations and guidelines for the environmental impacts of the proposed array configurations (DTOcean).

Wave Energy Centre (2012). Report on methodology, evaluation matrix and overall constraints (TROPOS).

Zubiate, L., Villate, J.L., Torre-Enciso, Y., Soerensen, H.C., Holmes, B., Panagiotopoulos, M., Neumann, F., Rousseau, N., and Langston, D. (2009). Methodology for site selection for wave energy projects. In Proceedings of 8th European Wave and Tidal Energy Conference, (Southampton, UK).

Património Cultural Subaquático: Abordagens e Tecnologias

A. Salgado (1), J. Freire (2) T. Fraga (2) e J. Russo (2)

(1) CINAV – Centro de Investigação Naval, alves.salgado@marinha.pt.

(2) jorge.vfreire@gmail.com; fraga.tiago@gmail.com; russochief@gmail.com.

Abstract: Oceans and inland seas are frequently monitoring target for different institutions with a broad range of technologies and purposes. These are often the costliest part of a project. Maximized and coordinated logistics and scientific disciplines are, as ever, the solution.
With this awareness, the CINAV's HistArC - History and Archaeology of Maritime Conflict Research Program, has established informal partnerships and collaboration agreements, in order to optimize resources and maximize synergies. As examples, the Archaeological Underwater Charter of Cascais (ProCASC) and the Project U-35, with the Task Force for the Continental Platform Extension (EMEPC), Robotics Engineering Laboratory of the Instituto Superior Técnico from the Universidade de Lisboa (LARSyS-ISR/IST-UL), Vision-Box company and, National Geographic Magazine.
With these optimizations and maximizations, on a clearly win/win outcome, we rethought new uses for classical technologies or developed new methods, as 3D printing from multibeam data, or biometric recognition algorithms to identify individuals in historical pictures.

Key words: U-35, 3D model, biometric facial recognition, Patrão Lopes, bens Culturais subaquaticos.

1. INTRODUCÃO

De entre os meios em que a ciência arqueológica opera, o aquático será, possivelmente, aquele que maiores desafios logísticos e técnicos implicará.

Quando consideramos profundidades de âmbito recreativo, a maioria dos arqueólogos munidos com formação e treino em mergulho avançado, responderá eficazmente e em segurança. Já para profundidades de âmbito técnico, apenas aqueles providos de formação e treino em mergulho técnico, nomeadamente em circuito fechado (*Rebreather*), responderão adequadamente.

Em qualquer dos casos, exige-se uma logística específica associada, que se adiciona aquela que é requisito convencional da arqueologia: gases, por vezes ternários (Trimix), manutenção, reparação e renovação de equipamento de mergulho, embarcação, combustível, marina, entre outros.

A dimensão do problema aumenta de complexidade, quando falamos da multidisciplinaridade que cada vez mais se exige em projetos de arqueologia em meio aquático. Campanhas de geofísica: sonar de varrimento lateral, multifeixe, gradiómetro, magnetómetro, ferramentas tecnológicas de ponta, em evolução acelerada e permanente, também elas a exigirem outros meios e técnicos especializados.

Tudo isto implica avultados custos, logo, necessidades de maiores financiamentos.

Atendendo a que o momento económico em que vivemos é desfavorável aos projetos científicos, particularmente aos de âmbito cultural, encontrar formas articuladas de parceria multidisciplinar comporta um enorme desafio. Além disso, importa que as sinergias conseguidas potenciem conhecimento e experiência de valor recíproco, principalmente em novas formas de pensar e em novos usos para as ferramentas multidisciplinares. A conjugação de todos estes fatores pode hoje ser, o elemento decisivo entre viabilizar ou inviabilizar um projeto.

O que trazemos para este resumo são quatro exemplos, agrupados em dois grupos: parceria e sinergia, e, novos usos tecnológicos.

Nestes exemplos, demonstrar-se-á como pode ser possível, sem custos dedicados adicionais, empregar meios pesados e sofisticados na prospeção de um destroço a mais de 650 m de profundidade, na caracterização de um achamento de um bem cultural subaquático da Grande Guerra junto do Bugio, ou, como se pode produzir um modelo analógico 3D com dados de geofísica e, por fim, como identificar indivíduos em fotografias históricas com algoritmos biométricos de aeroporto.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Parcerias e sinergias

O primeiro exemplo parte do acontecimento histórico de 24 de Abril de 1917. O submersível imperial alemão U-35, comandado pelo "ás dos ases" Lothar von Arnauld de la Perière (1986-1941), afundou 4 navios ao largo de Sagres e de Lagos. Um deles, o veleiro italiano *Bieneimé Prof. Luigi*, foi afundado com cargas explosivas e repousará a cerca de 650 m de profundidade.

O CINAV, no âmbito do projeto que desenvolve em torno deste episódio histórico (http://projectu35.wix.com/projectu35), necessitava de localizar aquele destroço mas, àquela

profundidade, os meios necessários eram proibitivos. No entanto, a sinergia com a Estrutura de Missão para a Extensão da Plataforma Continental (EMEPC), permitiu aproveitar o mergulho de teste que o ROV *Luso*, a bordo do NRP *Gago Coutinho*, necessitou fazer a caminho de uma das suas missões, para procurar pelo destroço (Fig. 1).

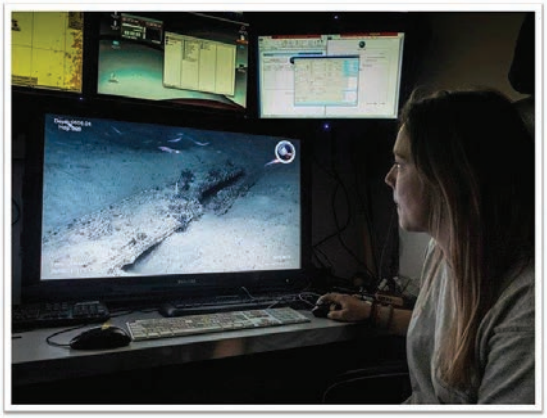


Fig. 1. Estrutura de madeira, identificada aos 651 m.

Um outro exemplo, a partir de um episódio surgido em 1916, quando Portugal requisitou os 72 navios alemães e austro-húngaros surtos nos portos portugueses, e com isso precipitou a sua entrada na Grande Guerra. Um desses navios, o mais pequeno deles, era o navio de salvamento alemão *Newa*, rebatizado *Patrão J. Lopes*.

Este navio haveria de ter uma extensa e muito significativa vida útil ao serviço da Armada, que apenas terminou quando em 1936, precisamente numa missão de salvamento, encalhou e se perdeu no Cachopo Sul junto do Bugio. Esquecido por uns, desconhecido por outros, assim permaneceu até que exatamente uma missão multidisciplinar articulada e sinérgica se reuniu e o visitou.

Esta missão ocorreu na primavera de 2015, no âmbito do Cruzeiro Cientifico EMEPC/M@rbis2015 em Cascais, quando uma equipa de mergulhadores biólogos e arqueólogos, reencontraram não só o destroço, mas recuperaram a história esquecida do navio.

Num local de fortes correntes e próximo de dois canais de intensa navegação, a opção do registo geofísico era óbvia. No entanto, mais uma vez, o custo associado a uma campanha geofísica dedicada seria significativo.

A solução para o problema veio novamente pelas mãos de uma missão simbiótica e sinérgica, desta vez com o Laboratório de Robótica e Sistemas de Engenharia do Instituto Superior Técnico (LARSyS-ISR/IST-UL). Aproveitando a disponibilidade do equipamento de registo multifeixe estar nas imediações do sítio arqueológico, foi possível obter uma primeira imagem tridimensional dos destroços (Fig. 2). Os custos foram aqueles que decorreriam do âmbito do LarSyS, ainda assim, partilhados, com a colaboração da Marina de Oeiras e da Administração do Porto de Lisboa (APL).

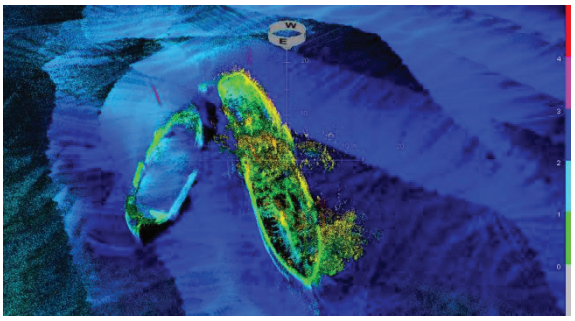


Fig. 2. Multifeixe do NS Patrão Lopes (Dta.) e a barcaça Franz (Esq.), realizado pelo LARSyS-ISR/IST-UL.

2.2 Novos usos e novos métodos

Nos projetos que desenvolvemos no âmbito do HistArC, do CINAV, está permanentemente no horizonte o desenvolvimento de novas metodologias e técnicas, assim como, neste âmbito e contexto, repensar os usos a dar a dados clássicos da Arqueologia, ou, das atividades multidisciplinares que desenvolvemos em parceria e/ou sinergia. Os exemplos que se seguem encontram-se, de novo, no âmbito do Projeto U-35.

No primeiro caso, o ponto de partida foi o registo geofísico por multifeixe, realizado com o apoio da empresa parceira SUBNAUTA, de três dos destroços correspondentes aos quatro navios que o U-35 afundou em 24 de Abril de 1917. O escolhido, foi o destroço que ia ser investigado em 2015, correspondente ao cargueiro a vapor norueguês SS *Vilhelm Krag* (Fig. 3) e que se encontra ao largo da Praia da Luz, em Lagos.

Pensando o que fazer com os dados do registo geofísico por multifeixe ali realizado, testámos a sua utilização num ficheiro *.stl*, que viabilizasse a impressão tridimensional do modelo gerado e correspondente.

Impresso o modelo (Fig. 4), este foi complementado com alguma interpretação, adicionando-se elementos com massa de modelar sob *foamboard*, a que se aplicou uma camada de primário de cor neutra, branco no caso (Fig. 5).

Por fim, foram acrescentadas cores por processo manual, simulando concreção e oxidação do aço do casco e estruturas do despojo, assim como notas de simulação de organismos vivos para um "maior realismo", contribuindo para a conclusão do modelo interpretativo (Fig. 6).

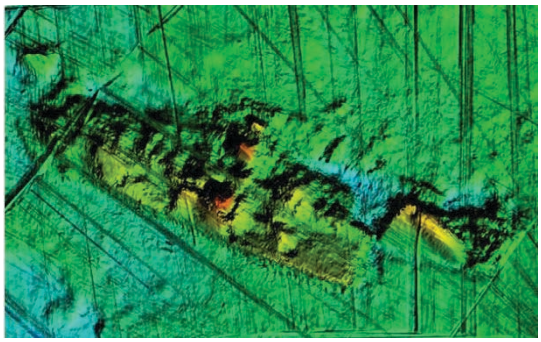


Fig. 3. Registo geofísico por multifeixe do SS Vilhelm Krag.

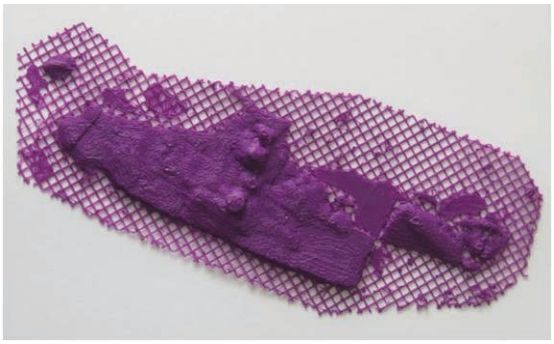


Fig. 4. Modelo impresso 3D, do destroço do SS Vilhelm Krag.



Fig. 5. Massa de modelar e primário aplicados.



Fig. 6. Modelo analógico 3D do destroço do SS Vilhelm Krag.

Conseguiu-se deste modo transformar o registo 2D num registo 3D, na resolução e especificidades da aquisição de dados em registo, por multifeixe no caso, produzindo-se assim a base para uma ferramenta analógica tridimensional de arqueografia.

Este modelo analógico 3D, revelou-se da maior importância nas críticas tarefas de interpretação do destroço, planeamento das imersões (cerca de 40 m de profundidade), planeamento dos trabalhos, e informação dos mergulhadores (Briefing e Debriefing).

O segundo caso, resulta de uma abordagem completamente diferente, ligada ao mesmo cargueiro SS *Vilhlem Krag*, agora ainda enquanto SS *Nordpol*. A questão não se prendeu com o bem cultural corpóreo, mas com um tripulante de nome Hans Larson (Fig. 7), avô de Hans Nielson, cidadão norueguês que nos relatou a história do seu avô. Nielson, deu-nos conta da magnífica biografia do seu familiar, e um conjunto historicamente muito relevante de fotografias da época.



Fig. 7. (Esq.) Hans Larson, tripulante do SS Nordpol, mais tarde renomeado SS Vilhelm Krag. (Dta.) Uma outra fotografia de Hans Larson, gentilmente cedida pelo seu neto Hans Nielson.

Deste conjunto, faziam parte diversas fotografias de Larson, do navio, e também duas fotografias de conjunto: uma de um casamento segundo informação de Nielson (Fig. 9), e outra de uma tripulação a bordo do SS *Vilhem Krag* enquanto *Nordpol*, algo inquestionável pelo nome constante das boias que aparecem na imagem (Fig. 10).

Hans Nielson informou-nos da prudência necessária a ter em relação às fotografias de conjunto. Sobretudo porque não conseguia identificar o seu avô em nenhum dos homens ali retratados. Colocava inclusivamente em causa se ele estaria na fotografia. Podia eventualmente tratar-se de uma tradição familiar situa-lo naquele acontecimento.

O problema chegava-nos então sob o seguinte enunciado: como identificar, de forma científica, sujeitos, em fotografias históricas onde constam conjuntos de indivíduos?

A resposta como hipótese metodológica chegou através da possibilidade de contactar alguém que se dedicasse a identificar sujeitos em grupos de indivíduos. Ora, nos aeroportos, esse exercício é, hoje, uma atividade de segurança estandardizada e comum.

Quando quisemos saber, por exemplo no aeroporto de Lisboa, quem assegura o hardware e o software para tal tarefa, chegámos a uma das empresas líderes mundiais destas soluções, que é portuguesa, e que tem sede em Lisboa, a Visio-Box (www.vision-box.com/).

Colocando-lhes o enunciado, a resposta foi imediatamente positiva, e começámos a trabalhar em conjunto para um teste.

A Vision-Box, através da aplicação de algoritmos de análise biométrica, comparou as fotografias de conjunto, com as fotografias confirmadas de Larson.

Para tanto, utilizou algoritmos de identificação biométrica da face, que relacionam imagens entre si comparando características biométricas, o que resulta num valor de possibilidade de correlação.



Fig. 9. Fotografia de um casamento, onde alegadamente, mas não comprovadamente, estaria Hans Larson. O teste efetuado pela Vision-Box, permitiu identificar Larson (Na fila em pé, o terceiro da Esq.).

Ou seja, o que se obtém e analisa é o número de vezes que o algoritmo falha (Identificações falsas), por quantidade de testes feitos, sendo que, o resultado começa a ser positivo a partir de índices de 40 ou superiores, ou seja, cerca de 1 falso positivo a cada 100.000 identificações.

No caso, os resultados decorrentes do estudo apontam, com algum grau de certeza, que Larson estava de facto em ambas as fotografias de grupo.



Fig. 10. Fotografia da tripulação a bordo do SS Nordpol, onde também a Vision-Box também identificou Larson, recorrendo a algoritmos biométricos de reconhecimento facial (Sentado, o primeiro da Esq.).

3. CONCLUSÃO

Os exemplos aqui analisados desenvolvidos ou apoiamos no Programa de Investigação em História e Arqueologia Marítima dos Conflitos (HistArC), do CINAV – Centro de Investigação Naval, demonstram que é possível, com base num esforço coletivo, desenvolver iniciativas complexas de ordem técnica e cientifica, que num contexto exclusivo de financiamento dedicado e específico seriam inviáveis.

Naturalmente que, estes resultados e a viabilização destas parcerias e sinergias, muito se devem à vontade das instituições e das suas pessoas, mas estamos em crer que este é o caminho para uma maior e mais racional forma de fazer ciência, que se materializa numa menor fragilidade dos projetos em face das dependências.

Estamos ainda e por fim em crer, que nestes quatro casos apresentados, o resultado foi francamente *win*/*win*, de resto pressuposto de base, e que assim, todos os envolvidos ganharam em conhecimento, experiência e espessura prática e metodológica, com o investimento que de qualquer das formas teria acontecido, com ou sem esta articulação de abordagens e tecnologias em bem cultural subaquático.

A publicação não académica veio com o apoio da edição portuguesa da National Geographic Magazine, sendo possível que a edição nórdica publique o caso de Hans Larson.

Agradecimentos

Temos naturalmente que agradecer, a todas as instituições que direta e indiretamente estiveram e estão ligadas aos exemplos que aqui resumimos, e outros que decorrem de projetos que desenvolvemos, assim como às pessoas neles envolvidos, sem os quais não teria, nem será possível este tipo de articulações e sinergias.

Posicionamento de amostras sedimentares através de sistema de posicionamento acústico USBL

S. Silva (1), N. Lapa (1), A. Vinhas (1), R. Santos (1), J. Duarte (1) e F. Ferreira (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas nº 49 1249-093 Lisboa, sandra.silva@hidrografico.pt.

Resumo: Encontra-se neste momento em fase de implementação no Instituto Hidrográfico (IH) o posicionamento de amostras sedimentares utilizando um sistema de posicionamento acústico *Ultra Short Baseline* (USBL), *Global Acoustic Positioning System* (GAPS) da IXBLUE. A aplicação desde método levanta algumas questões, como a sua colocação, registo e tratamento dos próprios dados de posicionamento e incerteza associada à posição adquirida.
Esta comunicação pretende apresentar um resumo dos primeiros resultados de posicionamento de amostras superficiais com sistema USBL obtidos em duas missões, que ocorreram a bordo do NRP "Auriga" em 2014 e no inicio deste ano, ao largo de Cascais e de Setúbal respetivamente, mostrando o esquema de montagem do sistema, colocação do transponder e tratamento dos dados obtidos.

Palavras-chave: amostragem, posicionamento acústico, incerteza, GAPS.

1. INTRODUÇÃO

Uma menor incerteza no posicionamento de equipamentos no mar é cada vez mais essencial quando, o desenvolvimento de novos equipamentos leva a trabalhar com uma melhor resolução na caraterização do fundo marinho.

A possibilidade de determinação da posição de qualquer equipamento ou estrutura através do cálculo da distância da propagação de uma onda acústica, associado a um sistema inercial e um sistema de GNSS (*Global Navigational Sattelite System*), é neste momento um dos métodos de posicionamento que apresenta uma menor incerteza.

O posicionamento de amostras sedimentares através de um sistema de posicionamento acústico *Ultra Short Baseline* (USBL), *Global Acoustic Positioning System* (GAPS) da IXBLUE, encontra-se em fase de implementação no Instituto Hidrográfico (IH). Esta metodologia foi colocada em testes em duas missões de colheita de sedimentos superficiais que decorreram em 2014 e no início de 2016, a bordo do NRP "Auriga", ao largo de Cascais e de Setúbal, respetivamente.

Estas missões permitiram testar a adaptação do GAPS para obtenção da posição dos colhedores do tipo *Smyth McIntyre* (SMT) e elaborar um procedimento para este tipo de operações. Com os dados adquiridos foi possivel obter a posição da amostra colhida, com respetiva incerteza, avaliar o desempenho do sistema GAPS neste tipo de operações e estudar o comportamento do colhedor durante a colheita.

2. SISTEMA USBL GAPS IXBLUE

O GAPS é uma unidade portátil de posicionamento acústico USBL, integrada com um *Inertial Navigation System* (INS) e com um sistema de posicionamento global por satélite, podendo ser instalada em qualquer plataforma (navio, cais, etc.) de forma autónoma, sem necessidade de integração com outros sistemas (IXBLUE, 2008). Atualmente este sistema encontra-se implementado no IH para se obter um posicionamento a tempo real do ROV (*Remotely Operated Vehicle*) NAVAJO, nos navios classe Andrómeda, e do sonar lateral KLEIN 5000 nas unidades auxiliares do tipo Atlanta, e mais recentemente dos colhedores de sedimento, tema desta comunicação.

O bloco de posicionamento acústico USBL, constituído por 1 transdutor e 4 hidrofones, que permite a determinação da posição até oito *transponders* em simultâneo, colocados em vários equipamentos ou estruturas que se pretendam posicionar, relativamente ao sistema de eixos ortogonais do GAPS. Este bloco por sua vez integrado com dois sistemas: o INS, que fornece os dados de atitude do GAPS necessários para calcular a posição do *transponder* relativa ao GAPS, orientando-a relativamente ao Norte e à vertical; e o recetor GNSS que permite posicionar o *transponder* relativamente a um sistema global de referência através de uma antena e recetor GNSS integrado, ou de um recetor GNSS externo ligado à unidade de controlo do sistema (Figura 1 e 3). Por fim as posições calculadas são filtradas em tempo real por um filtro de *Kalman* antes de serem exportadas na mensagem *output* gerada pelo GAPS. A posição final apresenta uma incerteza de cerca de 0.4% da distância (Procedimento de Trabalho GAPS).

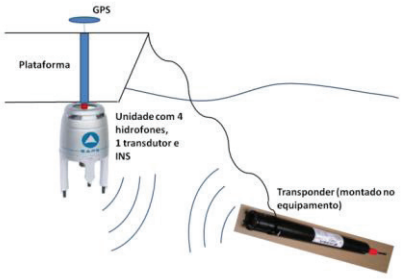


Fig. 1. Esquema exemplificativo do funcionamento do GAPS operado a partir de um navio (plataforma) e utilizando o sistema GNSS integrado.

3. PREPARAÇÃO E OPERAÇÃO DO SISTEMA

A preparação do sistema iniciou-se na colocação do *transponder* no colhedor SMT. Para este fim foi pensada uma estrutura em aço inox que abraçasse o *transponder* e permitisse: a sua fixação num dos braços do colhedor e a sua proteção (Figura 2). A estrutura consiste em duas meias luas com sistema de fixação, através de porcas e parafusos, ao braço do colhedor. Após a colocação do *transponder*, outra meia-lua cobre este último fixando-se, do mesmo modo, à restante estrutura. Esta estrutura permite proteger o *transponder* mantendo desobstruída a sua cabeça onde se encontra o transdutor, que comunica com o sistema fixo na plataforma.



Fig. 2. Fotografia da parte da estrutura fixa ao braço da draga à esquerda, e à direita a mesma com o transponder e a restante parte da estrutura montada.

Para a montagem do sistema no navio foi utilizado o mesmo procedimento já testado para operações com o ROV NAVAJO. Este consiste num sistema de varas que é fixo na borda do navio, neste caso classe Andrómeda, onde numa extremidade se encontra a unidade de posicionamento acústico com INS e recetor GNSS integrado, e na outra extremidade a antena de GNSS e respetiva comunicação com a unidade de controlo.

A unidade de controlo é montada num local seco, no laboratório, com uma saída do posicionamento a tempo real do colhedor para o software HYPACK, de hidrografia. Este último permite sobre, por exemplo, uma cartografia do fundo acompanhar em tempo real o percurso do colhedor e verificar o afastamento da posição planeada para a colheita da amostra (Figura 3).

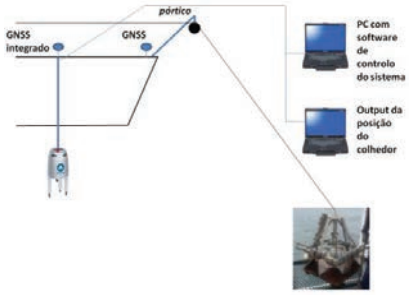


Fig. 3. Esquema exemplificativo da montagem do sistema.

Por fim, foi preparado um recetor GNSS móvel e montado junto ao pórtico de onde é lançado o colhedor (Figura 3). Este sistema móvel permite replicar o método de posicionamento de amostras até hoje utilizado. Este consiste na marcação de uma posição instantânea (GNSS) quando o colhedor chega ao fundo, designado por "Fora". Deste modo é possível fazer uma comparação de distâncias entre os valores do posicionamento segundo o método utilizado até hoje e o posicionamento obtido pelo GAPS.

Após a preparação do sistema realizaram-se duas missões teste. A primeira missão decorreu em 2014 a bordo do NRP "Auriga", ao largo de Cascais. Nesta missão testou-se pela primeira fez o posicionamento acústico do colhedor SMT. Embora os dados não tenham sido conclusivos, devido a uma avaria do sistema, o procedimento de colocação do *transponder* no colhedor e colocação do sistema em aquisição pôde ser testado. Foi ainda testado a introdução da posição do colhedor no *software* HYPACK onde foi possível acompanhar em tempo real, embora com poucos dados devido ao problema do sistema.

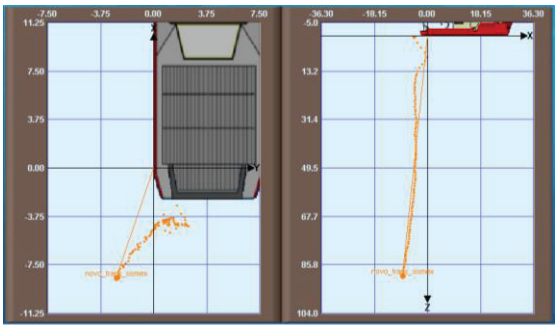


Fig. 4. Printsreen realizado no software de aquisição do sistema GAPS, MMI (Man Machine Interface), onde se verifica o percurso de descida da draga no eixo X, Y e em Z.

O equipamento foi enviado ao fornecedor para reparação, quando regressou realizou-se uma missão SISMEX/SEDEX ao largo de Setúbal onde se pode aplicar o mesmo procedimento anteriormente testado desta fez conseguindo obter-se um bom seguimento do percurso do colhedor durante a colheita das amostras (Figura 4).

4. RESULTADOS

Os resultados apresentados referem-se à segunda missão descrita anteriormente.

Após a extração dos dados, através de rotinas desenvolvidas em MATLAB, pode-se fazer uma análise dos dados em folhas de cálculo e num projeto SIG. Esta análise consistiu em verificar a deteção do *transponder*, ou seja, do colhedor ao longo do seu percurso, avaliando: os saltos de posição, verificando qual o comportamento do colhedor quando a colheita era realizada; a extração da posição da amostra e respetiva incerteza dada pelo sistema; e comparar com a posição retirada pelo método de posicionamento até hoje utilizado.

As figuras 5 a 8 resumem o tipo de dados adquiridos, exemplificados por duas amostras, E14 e E75 colhidas a uma profundidade de 219.9 m e 86.9 m, respetivamente. Nas figuras 5 e 6, para cada amostra, têm-se três diferentes posicionamentos: o Fora Hypack, que representa a posição da amostra como era feito até hoje, dada pelo recetor GNSS montado junto ao pórtico; a Posição Navio, que representa as posições do navio durante a colheita, dada pelo GNSS integrado do GAPS que se encontra no topo da vara; e a Posição SMT, que representa a posição do colhedor durante o seu percurso, dada pelo GAPS. Neste último posicionamento a gradação de cores dão a informação da sua profundidade.

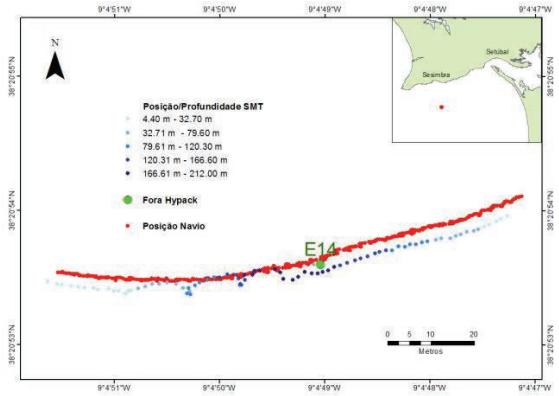


Fig. 5. Posições Fora Hypack, Navio e SMT durante a recolha da amostra E14, projetadas num projeto SIG para análise de dados.

No geral verificou-se um bom seguimento do colhedor ao longo da sua colheita. Por vezes alguns saltos eram verificados, nos primeiros metros de profundidade e por vezes junto ao fundo. Muito raramente verificaram-se saltos nas posições do navio e do colhedor.

As figuras 7 e 8 mostram a variação da profundidade do colhedor ao longo da colheita. Esta profundidade é calculada pelo GAPS. No geral verifica-se que quando esta atinge um máximo e estabiliza por 1 a 2 segundos, significa que o colhedor fechou recolhendo a amostra, embora não se saiba se é válida ou não.

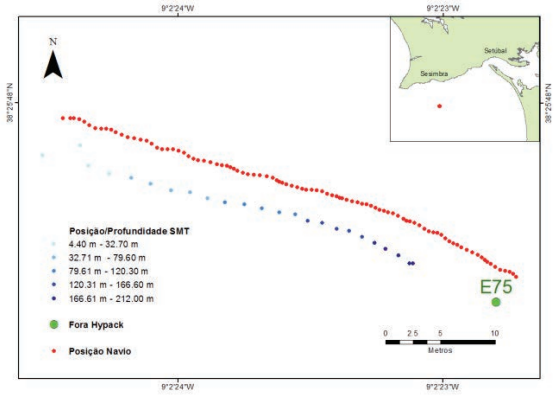


Fig. 6. Posições Fora Hypack, Navio e SMT durante a recolha da amostra E75, projetadas num projeto SIG para análise de dados.

Sendo que a recorrência escolhida do sistema de posicionamento acústico é de 1 segundo, os dados obtidos (deteção ou filtrados) do colhedor são na ordem da mesma taxa. Em raras exceções ocorrem saltos dos valores de profundidade, mais frequentemente a maior profundidade, como se pode ver na figura 7.

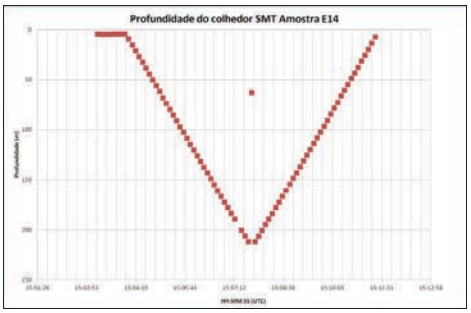


Fig. 7. Variação da profundidade do colhedor SMT na colheita da amostra E14.

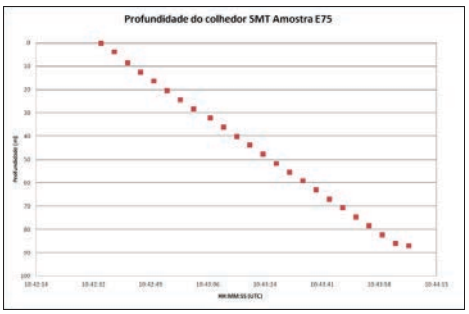


Fig. 8. Variação da profundidade do colhedor SMT na colheita da amostra E75.

A cada posição detetada pelo sistema existe uma incerteza atribuída, valor este que deve ser associado à posição da amostra. Este valor é calculado pelo GAPS através de um somatório quadrático de vários erros que incluem: erro de posição à superfície (associado ao GNSS), erro de monitorização da atitude (associado ao INS) e o erro de estimativa da medição, através do som, da distância e ângulo

(associado ao sistema USBL) (informação obtida pelo serviço técnico da IXBLUE).

Esta incerteza é representada por uma elipse de erro, através de quatro valores: valor do eixo maior da elipse de erro, o eixo menor da elipse de erro, o desvio em Z (profundidade) e o ângulo de orientação, em relação ao N, da elipse de erro (IXBLUE, 2008). Na figura 9 estes valores encontram-se representados pelas letras a, b, c e d respetivamente.

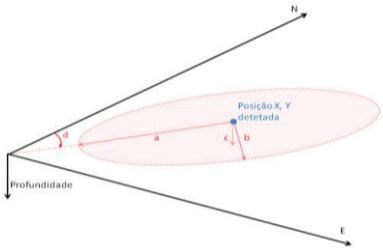


Fig. 9. Elipse de erro associada à posição detetada pelo sistema USBL GAPS.

Por fim a comparação entre as posições das amostras obtidas pelo GNSS montado junto ao pórtico, e pelo GAPS resultou num valor médio de 4.5 m de distância entre as mesmas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No geral, obteve-se um bom acompanhamento do colhedor SMT durante as colheitas de amostras o que permitiu perceber melhor o comportamento do colhedor.

A adaptação, descrita na preparação do sistema mostrou-se ser eficiente nas colheitas. Esta permitiu que o *transponder* comunicasse com a parte do sistema montado no navio e ainda que o mesmo ficasse protegido, não se movendo dentro da estrutura nem sofresse qualquer dano.

Na análise dos dados constataram-se alguns comportamentos de deriva do colhedor, à superfície, talvez devido a correntes existentes no local, e no próprio percurso do colhedor atendo também que o próprio navio sofre deriva. Estes comportamentos, embora conhecidos na prática da operação dos mesmos, foram possíveis provar pelo registo do seu posicionamento.

Os saltos de posição verificados podem ser devidos a várias situações nomeadamente, à direção do *transponder* em relação ao sistema montado no navio. Nos primeiros metros ou mesmo na colheita, o colhedor poderá ficar posicionado de modo a que a cabeça do *transponder* não consiga comunicar com os hidrofones da estrutura fixa ao navio, e por isso resultar em cálculos erráticos por parte do GAPS. Quando se verifica saltos nas posições do navio e do colhedor, estas devem-se essencialmente a saltos na própria posição absoluta dada pelo GNSS integrado. Este deve-se a existência de zonas de sombra em que a antena não rececione o número de satélites necessários para dar a posição.

A análise dos dados permitiu responder à questão do critério de seleção da posição da amostra. Esta conclui-se ser feita pela maior profundidade calculada do *transponder* aquando a sua deteção. Atendendo a isto criou-se uma rotina para que se encontre, nos dados output do GAPS, a maior profundidade e se obtenha a respetiva posição do *transponder*, ou seja, do colhedor e o erro de incerteza associado, representado pelos 2 eixos da elipse de erro, a orientação deste em relação ao N e o valor de desvio na profundidade.

No que diz respeito à distância média, entre os dois tipos de posicionamento das amostras é como o nome indica, um valor médio e não uma regra. Esta distância, mínimos e máximos verificados, dependerá de muitos fatores nomeadamente, manobra do navio, correntes, entre outros, mas principalmente de uma condicionante que é difícil quantificar, o erro humano (por exemplo no tempo entre ver a folga do cabo e dar o fora). No entanto, permite concluir que o método até hoje utilizado apresentava uma posição que poderia estar, neste exemplo, 4.5 m da posição real da colheita comparado com a posição obtida pelo GAPS, e considerando uma incerteza inferior a 1 m. Esta diferença pode ser decisiva na caraterização do fundo marinho.

A possibilidade de integração, em tempo real, da posição dada pelo GAPS num *software* que pode incorporar uma carta náutica, uma *shapefile*, por exemplo, de informação sobre o fundo permite uma colheita mais válida.

6. TRABALHOS FUTUROS

Sem dúvida, este é um passo importante de implementação no IH. Este procedimento irá ser estendido também em outros equipamentos, nomeadamente a outro tipo de colhedores de sedimentos. Sendo este sistema amovível, dever-se-á também ter em conta o empenho deste sistema em diferentes meios navais.

Um próximo passo passará também por obter um valor de incerteza, resumo dos 4 valores atribuídos pelo *output* do GAPS, para atribuir à posição da amostra e incluir esta informação nos seus metadados.

Agradecimentos

Agradece-se à guarnição do navio NRP "Auriga"

REFERÊNCIAS

IXBLUE (2008). *GAPS USER´S MANUAL*. 121 pp.

Procedimento de Trabalho GAPS. (publicação interna do IH, não publicada).

Observações de processos litorais: casos de estudo de S. Jacinto e Gelfa

N. Moreira da Costa (1), D. Mendes (2), B. Boto das Neves (2) e A. Jorge da Silva (2)

(1) Escola Naval, Base Naval do Alfeite; moreira.costa@marinha.pt

(2) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, nº 49 1249-093 Lisboa

Resumo: Apresentam-se as lições aprendidas com a realização de observações na região litoral, onde em virtude da interacção entre ondas e correntes é particularmente desafiante a obtenção de dados de campo. Foram realizadas duas campanhas em Junho e Setembro de 2015 na praia de S. Jacinto e da Gelfa, respectivamente. Em ambas as campanhas, os equipamentos foram fundeados, colocados na praia e outros foram lançados (flutuadores) durante pelo menos meio ciclo de maré.
A análise dos dados medidos mostra: diferenças entre parâmetros de agitação marítima (até 0.3 m na altura significativa da onda); e padrões semelhantes de correntes médias obtidas com equipamentos distintos desenvolvidos para observar o mesmo fenómeno. Os flutuadores derivantes mediram a corrente de deriva promovida pela agitação marítima à superfície. Estes flutuadores descreveram quantitativamente a largura e extensão de um agueiro.

Palavras-chave: Processos litorais, trabalho de campo, comparação de equipamentos, observatórios costeiros, RAIA.

1. MOTIVAÇÃO

A interacção entre ondas e correntes é mais intensa ao longo da faixa litoral Portuguesa. Nesta zona, as ondas que chegam à costa sofrem maioritariamente os fenómenos de refracção, empolamento e dissipação de energia induzida pelo fundo. A rebentação dá origem a uma transferência de momento para a coluna líquida. Esta transferência gera um aumento do nível médio junto à costa e correntes de deriva litoral (Svendsen, 2006).

Os processos referidos anteriormente devem ser estudados através de observações obtidas no campo. No entanto, as observações da hidrodinâmica litoral ao longo da costa Oeste portuguesa são escassas e normalmente confinadas à zona intertidal. Estas observações são fundamentais para compreender os processos litorais.

Este trabalho apresenta duas campanhas de campo realizadas no Verão de 2015 na praia de S. Jacinto e na praia da Gelfa com o objectivo de monitorizar a hidrodinâmica litoral. As observações cobriram toda a faixa litoral desde a zona de empolamento até à linha de costa (Figuras 1 e 2). O foco deste trabalho será nas campanhas realizadas, na comparação de parâmetros de agitação marítima e correntes estimadas por instrumentos semelhantes e nas observações de correntes à superfície.

2. OBSERVAÇÕES LITORAIS

2.1. Praia de S. Jacinto

A praia de S. Jacinto localiza-se a norte da embocadura da ria de Aveiro. S. Jacinto é uma praia com variabilidade morfodinâmica devido à orientação da linha de costa (010) e à direcção mais comum da agitação marítima (315ºN) (Figura 1). A combinação destes dois factores dá origem à formação de agueiros. Como esta praia é exposta, os agueiros são dinâmicos e dependem apenas da direcção da agitação marítima. Os sedimentos são caracterizados por areia fina com um diâmetro mediano de 0.2 mm.

A campanha de campo na praia de S. Jacinto ocorreu entre 17 e 19 de Junho de 2015 durante marés-vivas. Os equipamentos fundeados foram: um perfilador acústico de correntes (ADCP) (Figura 1 – quadrado vermelho), dois correntómetros acústicos (ACM) (Figura 1 – quadrados verdes), oito sensores de pressão (PT) (Figura 1 - círculos amarelos), dois velocímetros acústicos (ADV) (Figura 1 - triângulos vermelhos) e um correntómetro electromagnético (ECM) (Figura 1 - triângulo verde). A observação de correntes à superfície foi obtida através de vários flutuadores derivantes (WAVYs) que foram lançados a partir de mota-de-água na raiz da rebentação durante a baixa-mar e a preia-mar.

Todos os equipamentos possuíram taxas de aquisição elevadas (superiores a 0.5 Hz) por forma a estudar os processos litorais. Os PT observaram entre as 8h00 de dia 18 até às 2h00 de dia 19, os ADVs e o ECM apenas observaram meio ciclo de maré em torno da preia-mar de dia 18 e os ACM e o ADCP observaram desde as 20h00 de dia 17 até às 6h00 de dia 19.

A pressão atmosférica durante a campanha variou entre 1016 a 1013 hPa e o vento foi fraco (até 4 m/s) e variável. A agitação marítima foi constituída maioritariamente por uma ondulação bem definida

com alturas de onda até 2 m ao largo, períodos de pico de 12 s e uma orientação vinda do quadrante Noroeste. Estas condições foram favoráveis para uma deriva litoral com sentido Sul.

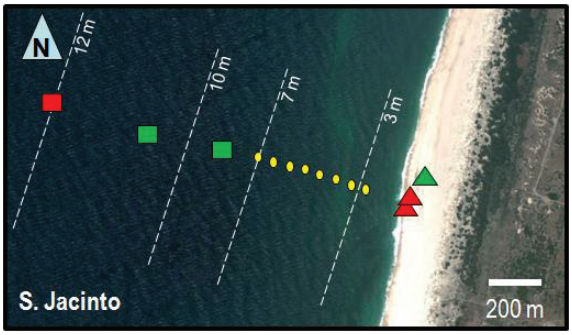


Fig. 1. Localização dos vários equipamentos na praia de S. Jacinto e linhas esquemáticas de batimetria referidas ao zero hidrográfico.

2.2. Praia da Gelfa

A praia da Gelfa localiza-se a Sul de Vila Praia de Âncora. Esta praia tem uma variabilidade morfodinâmica intensa por estar encaixada numa baía (Oliveira and Freire, 2011). Como em S. Jacinto, a orientação da linha de costa e a direcção mais frequente da agitação marítima promove a formação de vários agueiros (Figura 2). No entanto, na praia da Gelfa estes agueiros são mais estáveis devido à configuração da linha de costa. Os sedimentos são caracterizados por areia fina com um diâmetro mediano de 0.3 mm.

A campanha de campo na praia da Gelfa ocorreu entre 30 de Setembro e 1 de Outubro de 2015 durante marés-vivas. Os equipamentos fundeados foram: dois ADCP (Figura 2 – quadrados vermelhos), dois ACM (Figura 2 – quadrados verdes), oito PTs (Figura 2 - círculos amarelos), três ADVs (Figura 2 - triângulos vermelhos), três conjuntos de um ECM e um PT (Figura 2 - triângulos verdes). Vários WAVYs foram também lançados a partir de mota-de-água na raiz da rebentação durante a baixa-mar e lançados à mão da praia durante a preia-mar.

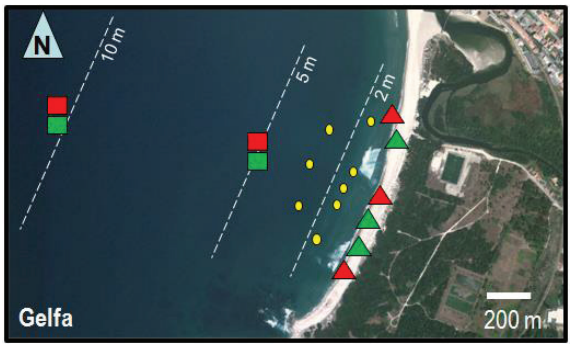


Fig. 2. Localização dos vários equipamentos na praia da Gelfa e linhas esquemáticas de batimetria referidas ao zero hidrográfico.

As taxas de aquisição dos vários equipamentos foram semelhantes às de S. Jacinto. Os instantes de observação foram variáveis. Os equipamentos que foram fundeados na zona da rebentação observaram pelo menos um ciclo de maré e os que foram colocados na zona intertidal, observaram no mínimo meio ciclo de maré em torno da preia-mar.

A pressão atmosférica durante a campanha variou entre 1010 a 1020 hPa e o vento foi moderado (até 6 m/s) com rajadas máximas de 9 m/s e variável. A agitação marítima variou entre vaga e ondulação com uma altura máxima de 1 m ao largo, períodos de pico de 11 s e uma direcção média de 280. Estas condições foram favoráveis para uma deriva litoral com direcção variável.

2.3. Planeamento das campanhas

A campanha realizada na praia de S. Jacinto foi planeada com base na batimetria disponível da praia de S. Jacinto. As batimétricas indicavam a localização de uma barra de maré entre os 3 e os 7 m ZH. Decidiu-se colocar oito PTs com um espaçamento reduzido (30 – 50 m) sobre a localização da barra de maré (Figura 1). As condições ao largo foram obtidas através do ADCP. Dois ACMs permitiram aumentar a resolução do perfil de observação e também fornecer estimativas de correntes de maré porque se encontram foram da zona de rebentação. Os ADVs e o ECM foram colocados na zona intertidal para medir a deriva litoral promovida pela agitação durante meio ciclo de maré em torno da preia-mar. De notar que os ADVs foram colocados na mesma estrutura por forma a fazer a comparação de correntes entre eles.

Após a análise detalhada das observações efectuadas na campanha de S. Jacinto, verificou-se que a zona de empolamento e de rebentação foi adequadamente monitorizada através de um perfil transversal devido à uniformidade longitudinal da praia. No entanto, surgiram dúvidas: quanto à comparação de pressões medidas pelo ADCP e pelo ACM; e se existia capacidade de monitorizar um sistema de agueiro.

A segunda campanha foi realizada na praia da Gelfa. Com base no voo LIDAR em 2011 e na batimetria mais recente, verificou-se a existência de um agueiro numa posição central da praia. Todos os equipamentos foram colocados ao longo de uma fiada na zona mais profunda de cada perfil longitudinal (Figura 2). As observações de correntes na zona intertidal foram também planeadas por forma a conseguir caracterizar o sistema agueiro com um posicionamento longitudinal compreendendo os canais de alimentação e a entrada do agueiro. Infelizmente, quatro PTs não mediram por motivos de configuração. Estes quatro PTs correspondiam aos PTs Norte e Sul de cada fiada.

2.4. Comparação de equipamentos

A taxa de aquisição do ADV Vector (Figura 3 – vermelho) foi de 8 Hz em modo contínuo, a do ADV Sontek (Figura 3 – azul) foi de 0.33 Hz para conseguir adquirir em modo contínuo. A

comparação entre instrumentos é efectuada por forma a comparar as correntes médias de 3 min medidas por cada um. Esta comparação implica a utilização de um filtro de médias móveis com 1440 pontos para o Vector e 60 pontos para o Sontek.

Os parâmetros do ADCP (RDI Workhorse 600 Khz) (vermelho) foram estimados através do módulo WAVES do equipamento. Estas estimativas tiveram em conta o espectro direcional obtido através das velocidades orbitais. Os parâmetros do ACM (Anderaa Seaguard) têm apenas em conta o sinal de pressão medido a uma frequência de 0.5 Hz e estes parâmetros surgem de uma análise espectral com base na *Fast Fourier Transform* com 20 graus de liberdade. Os parâmetros de agitação marítima foram obtidos através dos momentos espectrais integrados entre os 0.05 e 0.5 Hz.

3. RESULTADOS

3.1. Comparação de correntes em S. Jacinto

As correntes de deriva litoral durante a preia-mar na praia de S. Jacinto (Figura 3) apresentaram em média uma componente longitudal dirigida para Sul e para a costa. As correntes estão filtradas da componente de agitação marítima com um filtro de médias móveis de 3 min e a sua velocidade máxima foi de cerca de 0.6 m/s.

A comparação entre os dois ADVs (Nortek Vector, a vermelho e Sontek Triton, a azul) mostra que o padrão é semelhante ao longo do tempo. No entanto, o Vector apresentou flutuações mais elevadas na componente Este-Oeste entre as 14h30 e as 16h30 e na componente Norte-Sul durante todo o período de observação.

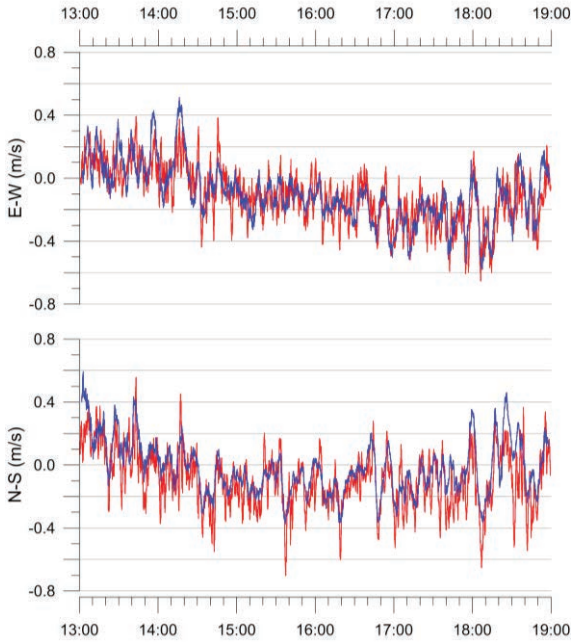


Fig. 3. Série temporal da componente Este-Oeste (cima) e Norte-Sul (baixo) da corrente média em 3 min para o Sontek Triton, a azul e para o Nortek Vector, a vermelho ao longo do dia 18 de Junho na praia de S. Jacinto.

3.2. Comparação de agitação marítima na Gelfa

A altura significativa (Hs) e o período de pico (Tp) durante a campanha de campo na praia da Gelfa (Figura 4) consistiram numa ondulação (Tp ~ 11 s) com baixa energia (até 1 m). As diferenças na Hs atingem os 0.3 m e no Tp até 1 s no dia 30 de Setembro.

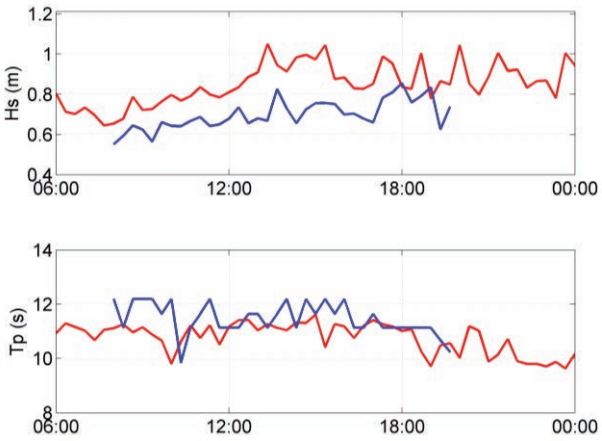


Fig. 4. Série temporal da altura de onda e período de pico para o ADCP (vermelho) e ACM (azul) a 10 m de profundidade na praia da Gelfa no dia 30 de Setembro.

3.3. Flutuadores derivantes

Vários flutuadores derivantes foram capazes de medir a corrente à superfície entre a zona de rebentação e a linha de costa. Estes flutuadores têm uma flutuabilidade optimizada que permite-lhes enviar um sinal de GPS a uma frequência de 1 Hz e em tempo real. As trajectórias destes dispositivos tecnológicos de baixo-custo (Figura 5) foram registadas durante o início da enchente de dia 18 de Junho. Estas trajectórias permitiram observar os padrões de circulação associados a um agueiro. Nomeadamente, a sua extensão, largura e velocidade à superfície no interior do agueiro.

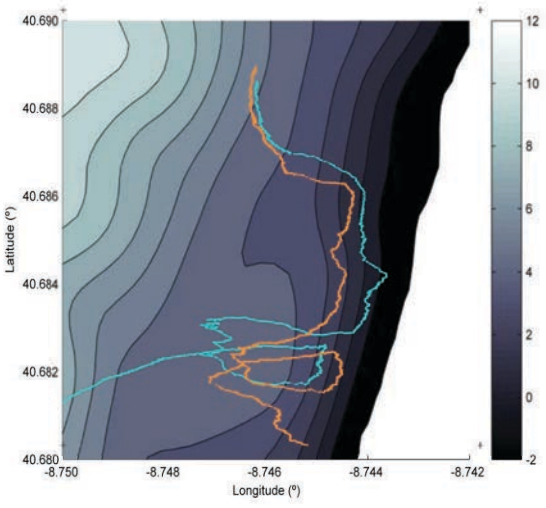


Fig. 5. Trajectórias registadas por dois flutuadores derivantes lançados na praia de S. Jacinto e topo-batimetria em metros referida ao zero hidrográfico.

4. DISCUSSÃO

A comparação entre os dois ADVs mostra que apesar de algumas flutuações os instrumentos mediram essencialmente o mesmo padrão de corrente em termos médios. A escolha entre um e outro equipamento dependerá do processo em estudo (correntes de deriva ou correntes induzidas pelas velocidades orbitais).

A comparação entre o ADCP e o ACM na praia da Gelfa mostra dois comportamentos distintos. O Tp estimado pelos dois instrumentos é bastante semelhante. No entanto, a Hs pode atingir diferenças de 0.3 m. Esta diferença surge devido ao método de estimação dos parâmetros espectrais (velocidades orbitais ou pressão). De notar que, apesar de esta diferença ser espectável devido ao método de obtenção dos parâmetros de agitação marítima, esta comparação evidência o cuidado que se deve ter durante a utilização de dados de campo para verificação de modelos numéricos.

Vários flutuadores derivantes foram capazes de estimar as correntes à superfície e caracterizar o padrão de circulação na presença de um agueiro. Sendo por isso um complemento às medições tradicionais efectuadas em zonas litorais.

5. CONCLUSÕES

As duas campanhas de campo realizadas recentemente na praia de S. Jacinto e na praia da Gelfa constituem uma base de dados de hidrodinâmica litoral extensa e precisa para futuros estudos de caracterização litoral e validação de modelos numéricos em duas praias da costa Portuguesa.

Os resultados das comparações indicam que a sensibilidade de dois velocímetros é distinta e que a comparação entre os parâmetros de agitação marítima tem diferenças significativas. Especialmente a Hs que atinge diferenças de 0.3 m.

Os flutuadores derivantes mostraram-se aparelhos tecnológicos de baixo-custo capazes de efectuar observações das correntes à superfície em zonas litorais ao longo do tempo. São por isso um complemento às típicas observações tradicionais.

Agradecimentos

Os autores agradecem a todas as pessoas que contribuíram e estiveram envolvidas nas campanhas de campo das seguintes entidades: Instituto Hidrográfico, Universidades de Aveiro, Lisboa, Porto e Algarve, Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores Tecnologia e Ciência, Marinha Portuguesa, Instituto de Socorros a Náufragos, Polícia Marítima e Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Este trabalho é um contributo para o projecto RAIA.co (0520\RAIA\CO\1\E), Observatório Marinho da Margem Ibérica e Litoral, financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional de Cooperação Transfonteiriça Espanha-Portugal (POCTEC).

REFERÊNCIAS

Oliveira, F. S., and Freire, P. M. (2011). Coupling Monitoring and Mathematical Modelling of Beaches to Analyse a Problem of Harbour Sedimentation: Case Study. *Journal of Coastal Research*, 27(6A), 104-115.

Svendsen, I. (2012). *Introduction to Nearshore Hydrodynamics*. World Scientific, 722 pp.

Observation of the near-shore circulation with lagrangian drifters developed by the RAIA coastal observatory

A. Jorge da Silva(1), D. Mendes(1), J. Pinto(1), B. Loureiro(2), M. Oliveira(2) and A. Rocha(3)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas 49, 1249-093 Lisbon (Portugal), jorge.silva@hidrografico.pt.

(2) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

(3) Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência.

Abstract: Studies of the nearshore circulation were initiated in the RAIA Coastal Observatory in 2013, and included modelling and field observations. Currents in the intertidal zone have been observed with acoustic and electromagnetic velocity meters, typically attached to scaffold frames. For the remaining surf zone, simple 12 cm diameter spherical drifters equipped with GPS receivers, acquiring position and speed at 1 Hz, were devised to build up trajectories from which current estimates were obtained. The drifters were launched from jet skis, close to low tide, and by hand from the beach, at high tide. Mobile communications were used for near real-time position monitoring, aided by a viewer, and a Bluetooth module for final data download prior to re-deployment.
The drifters have proven quite satisfactorily in two field experiments, with 100% data return. Simultaneous release of drifter sets allowed building realistic maps of the average surface current field. On the other hand, the repeated deployment of drifter sets revealed details of the rip currents, as well as of the boundary between wind-driven current at the inner shelf and wave-induced circulation in the surf zone. The viewer revealed useful both when searching for "freak" drifters and to build up an on-line record of historical experiments.

Keywords: Surface drifters, wave induced circulation, nearshore areas, rip currents, coastal observatories, RAIA.

1. MOTIVATION

Measuring the near-shore circulation is very challenging. For example, during a combination of strong wind- and sea-waves, it is practically impossible to moor instruments in the infra-littoral zone. Usually, observations are made in points fixed in space and performed with traditional instruments (Costa et al., 2016). These instruments are nowadays very accurate but do not provide spatial resolution and are inadequate to measure the current at the surface.

A first drifter able to monitor the surf zone surface currents was developed by Schmidt et al. (2003). It was basically a 0.5 m-height cylinder made of PVC, ballasted for near complete submergence, and with its vertical response dampened by a PVC disc at the bottom. A 0.7 m long GPS antenna was mounted on top in way that it never submerged. GPS data were acquired at 1 Hz for post processing and final positions estimated at 0.1 Hz. These drifters, therefore, responded to the mean current in the upper 0.5 m of the surf zone, with minimum disturbance of heave and roll, but provided no way to estimate the current at the very surface.

In an attempt to estimate the current in the upper 10 cm of the ocean, a small, low-cost, wave drifter able to perform well in the surf zone has been developed in the context of the RAIA coastal observatory. It was denominated *WAVY* drifter, and this is a presentation of its technical constituents as well as of the results of the first field tests.

2. *WAVY* DRIFTERS

The *WAVY* (Figure 1) is a 0.12 m-diameter, 750 g spherical drifter consisting of two concentric encapsulations, the inner one containing the payload. This payload consists of a GPS receiver and antenna, a CPU, a Bluetooth module, a GPRS module and antenna for real-time data transmission (if required), an inductively chargeable battery and ballast. Two perfectly adjusted semi-sphere caps of polyurethane resin protect the electronics from impacts, while a Clear Flex® layer completely seals off the system.



Fig. 1. WAVY drifters during Gelfa field experiment.

GPS sampling frequencies are possible up to 1 Hz. Position records are stored in a logger and may be displayed through a viewer in near real-time, a useful feature both when the deployment is made outside the surf zone and when attempting to locate and recover "freak" drifters. Magnetic switches are used to start/stop the data acquisition and the download.

The *WAVY* buoyancy was optimized in such a way that the drifter is submerged enough to reduce wind drag effects while allowing the GPS antenna to be always non-submerged. In such way, the drifters should continuously move with the nearshore surface current with minimum wind drag effect.

3. DATA AND METHODS

Two field experiments were performed in 2015 at S. Jacinto and Gelfa beaches (Costa et al., 2016), where *WAVY* deployments complemented the current observations with moored equipments. Typically, the drifters were launched by a jet-ski during low-tide in the shoaling zone. During high-tide, as the surf zone became narrower, they could as well be launched by hand from the beach into the breaking zone.

The *WAVY*s were usually launched in groups of 3 to 10. Records were kept of the time instants when (i) the jet-ski left the beach, the drifters (ii) were launched by hand, (iii) reached the coastline and (iv) were collected. This procedure made it easy to analyse the drifters' trajectories, and validate the current estimates, removing all ambiguity resulting from the transport by the Jet Ski. An on-line record of the field experiments was maintained making use of the viewer.

4. RESULTS AND DISCUSSION

At S. Jacinto, *WAVY* drifters launched during high-water were transported to the coastline by waves in about 10 min. In Figure 2, each dot corresponds to one position acquired every second. The dots are sparser in the breaking zone than in the shoaling zone. In the vicinity of breaking, the wave profile became much skewed and the wave crest was able to catch the drifters, thereby transporting them with the wave celerity: the *WAVY*s were surfing.

Near low-water, the circulation patterns were different (Figure 3). The wider surf zone allowed the drifters to float along the shoaling zone. Interestingly, they were able to track the circulation pattern associated with a rip current. All the drifters were caught by the seaward current but, while the yellow was capable to escape from the breaking zone, the others were transported shoreward by the breaking waves.

Two out of the twenty *WAVY* drifters made ready for the experiment had to be set aside, as they could not be started. The remaining ones had a 100% data return.

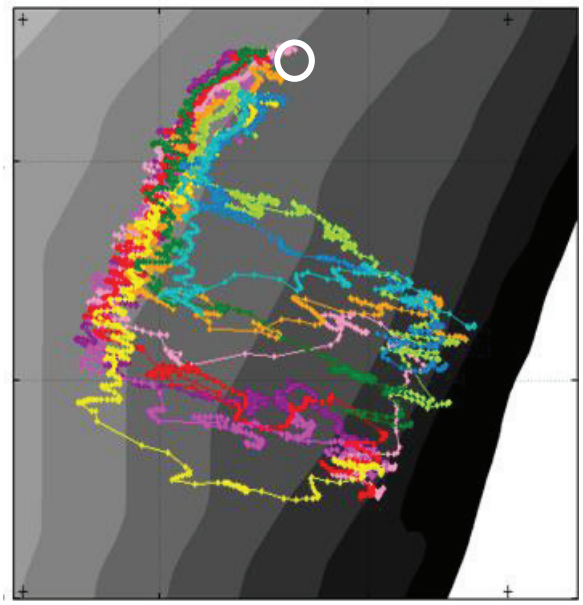


Fig. 2. Wave drifter trajectories at S. Jacinto beach from HW+00h44m to HW+00h54m. White circle represents the deployment location. Isobaths from 2 m to -5 m (relative to Chart Datum, positive downwards).

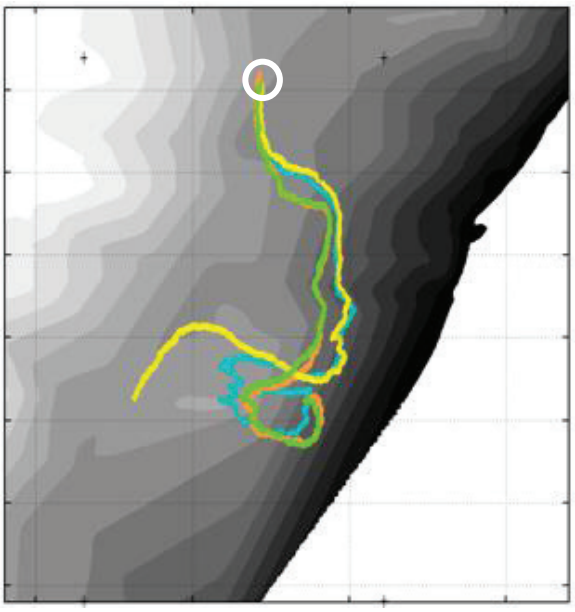


Fig. 3. Wave drifter trajectories at S. Jacinto beach from LW+02h11m to LW+03h26m. White circle represents the deployment location. Isobaths from 10 m to -5 m (relative to CD).

Figure 4 displays the evolution of a set of *WAVY* drifters at low-water during the Gelfa field experiment. As in S. Jacinto, all the operational *WAVY* drifters returned 100% of the data. The drifters were simultaneously launched at one single location, their trajectories clearly showing the variability of the surf zone. The red *WAVY* was rapidly transported to the coastline while the orange and the magenta ones drifted over the entire extent of the beach in a direction opposite to that of the littoral drift current, apparently escaping the wave action. The yellow and cyan drifters seemed to have described an intermediate pattern between the two,

having moved northward for a short while before being displaced shoreward.

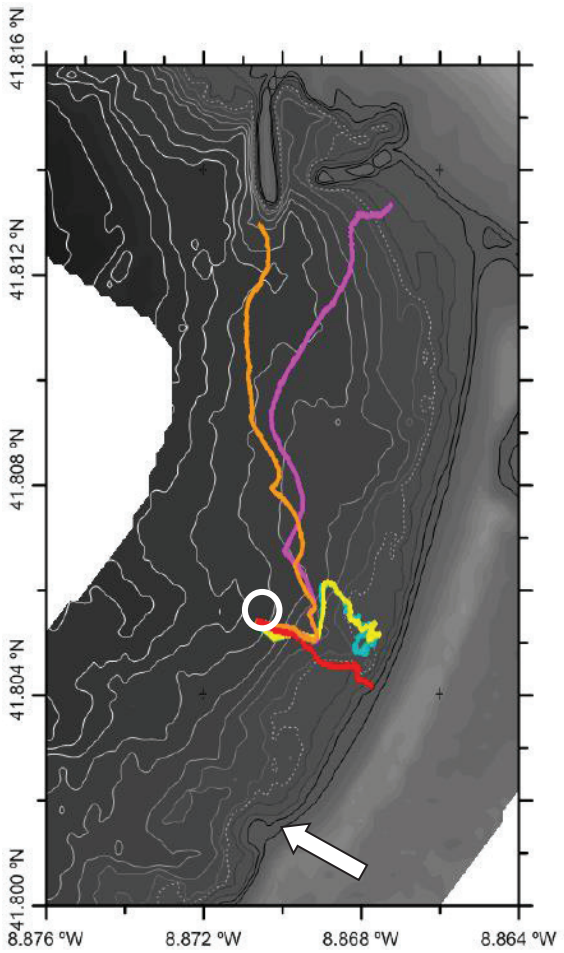


Fig. 4. Wave drifter trajectories at Gelfa beach from LW+00h14m to LW+02h32m. White circle represents the deployment location. Isobaths from 6 m to -5 m (relative to CD). Dotted line: -1.5 m.

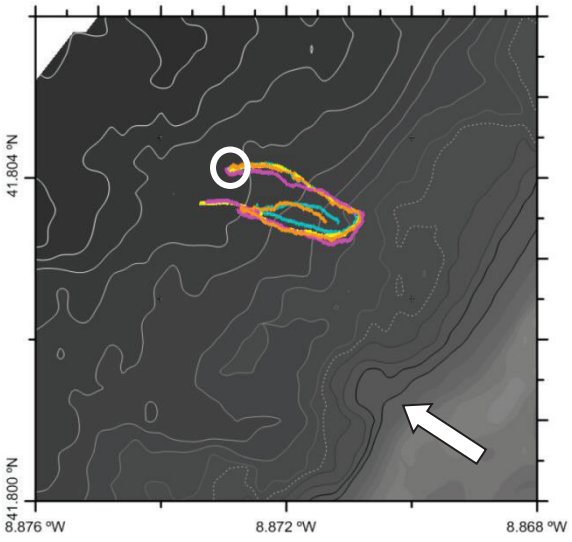


Fig. 5. Wave drifter trajectories at Gelfa beach from LW+00h13m to LW+00h53m. White circle represents the deployment location. Isobaths from 6 m to -5 m (relative to CD). Dotted line: -1.5 m.

The distinct pathways support the idea of the presence of a background current that, at least for a short while, acted upon all but the red drifter, which immediately suffered influence of the wave action. Also interesting is the adjustment of part of the trajectories to the local bathymetry.

The promontory in the southern part of the Gelfa beach, marked with a white arrow in the bathymetry (Figure 4), is made of rocky shelves, forcing the littoral drift current that comes from North to be projected seawards near it. This suggests that a persistent rip current is likely to occur just north of the promontory and should, therefore, be revealed by the *WAVY*s, as indeed happened (Figure 5).

By combining the several trajectories followed by the drifter groups, it was possible to build the time-averaged patterns of the surface current in the surf zone and how they varied in time (Figure 6).

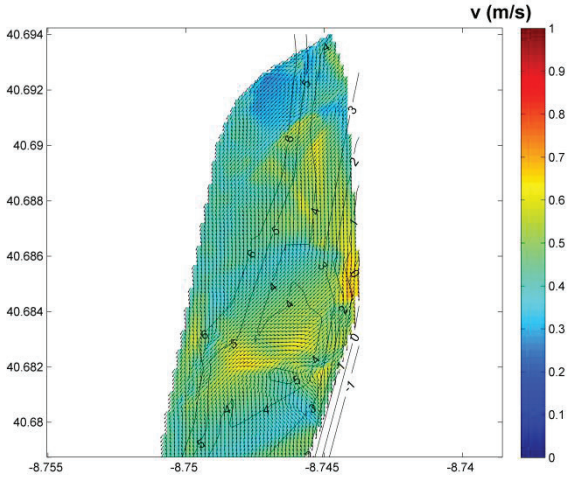


Fig. 6. Surf zone time-averaged current field derived from a combination of WAVY trajectories during the S. Jacinto field experiment. The black lines are isobaths (relative to CD).

When summing up the results of the two field experiments, the viewer was also very useful in building an on-line record both experiments.

5. CONCLUSIONS

The *WAVY* drifters revealed quite performing in the surf zone of both beaches where two field experiments were carried out, with 100% data return. Realistic maps of the average surface current field could be built based on trajectory sets, while repeated deployment of drifter sets revealed details of the rip currents, as well as of the boundary between wind-driven current at the inner shelf and wave-induced circulation in the surf zone. The viewer initially developed to track the evolution of the drifters in real time also revealed useful in building up an on-line record of the experiments which may be used as a quick-look of historical *WAVY* use.

Acknowledgements

Thanks are due to all the colleagues from the Universities of Algarve, Aveiro and Lisbon that contributed to and participated in the field work, as

well as to the teams of Navy divers that supported the mooring operations. The authors are also indebted to the Portuguese Maritime Authority for all the support in the deployment of the WAVY drifters.

This research is a contribution to project RAIA.CO, Observatório Marinho da Margem Ibérica e do Litoral, (0520_RAIA_CO_1_E), partly financed by the European Fund for Regional Development (EFDR) through the Programa Operacional de Cooperação Transfonteiriça Espanha-Portugal (POCTEC).

REFERENCES

Costa, N., Mendes, D., Boto das Neves, B. and Jorge da Silva, A. (2016) Observações de processos litorais: casos de estudo de S. Jacinto e Gelfa. *4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica* (this volume).

Schmidt, W. E., Woodward, B. T., Millikan, K. S., Guza, R. T., Raubenheimer, B., & Elgar, S. (2003). A GPS-tracked surf zone drifter. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **20**(7), 1069-1075.

Utilização da retrodispersão acústica normalizada na deteção de objetos

R. Santos (1), A. Rodrigues (1), F. Ferreira (1), C. Fradique (1), M. Miranda (1) e C. Monteiro (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. das Trinas, nº 49, 1249-093 Lisboa; ruben.santos@hidrografico.pt.

Resumo: O processamento de normalização do sinal acústico resultante do fenómeno da retrodispersão é habitualmente utilizado na caraterização remota dos sedimentos superficiais do fundo marinho, uma vez que depende diretamente da natureza dos materiais que o constituem. Neste trabalho são apresentados alguns exemplos da aplicação deste tipo de processamento na identificação de objetos que se encontram no fundo marinho, através da utilização de dados de SONAR (sistemas sondadores multifeixe), efetuando uma análise qualitativa das respostas acústicas obtidas entre diferentes materiais do fundo marinho e entre estes e um objeto com propriedades físicas contratastes.

Palavras-chave: deteção de objetos, retrodispersão, sinal acústico.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de sonar de varrimento lateral, magnetometria, ROV (*Remotely Operated Vehicle*), multifeixes são as técnicas que habitualmente são utilizadas na deteção de objetos no fundo do mar.

Os dados adquiridos pelos sondadores multifeixe, para efeitos cartográficos e de mapeamento de alta resolução permitem igualmente a deteção de objetos depositados no fundo marinho. Estes dados consistem, habitualmente, na combinação de dados batimétricos e de coluna de água (WCL - *Water Column*), de forma a obter o modelo da superfície que limita a camada de água e que inclui não só a morfologia do fundo, como também do objecto que está depositado sobre o fundo.

Os dados *raw* (série temporal) adquiridos pelos sondadores multifeixes também permitem a caraterização remota do fundo marinho através de um processo de normalização que permite a identificação da natureza do fundo marinho (ver Santos e Rodrigues, 2015). Dados os bons resultados que têm vindo a ser conseguidos com a aplicação desta ferramenta para a classificação remota do tipo de fundo, colocou-se a questão sobre as potencialidades da mesma metodologia para detetar e classificar remotamente outro tipo de objetos que não as formações geológicas. Desta forma, neste trabalho, pretende-se explorar a fase inicial do processamento dos dados de retrodispersão acústica para se conhecer o comportamento do algoritmo de normalização do sinal de retrodispersão, quando em presença de um objeto depositado sobre o fundo.

2. DADOS E PROCESSAMENTO

Os dados de retrodispersão acústica adquiridos nos levantamentos hidrográficos (LH) realizados no parque de mergulho recreativo *Ocean Revival* (Portimão), em 2014 e sobre o caça minas ex-N.R.P. "Roberto Ivens" (Lisboa), em 2016 permitiram a realização deste trabalho. Os LH foram ambos realizados com o sistema sondador EM2040C a operar na frequência de 300 kHz, sendo o posicionamento e atitude assegurado por um sistema DGNSS e um sensor inercial MRU5+. Os dados hidrográficos foram processados tendo em consideração o algoritmo CUBE - *Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator*, utilizado na modelação batimétrica, a partir dos quais se validou uma superfície batimétrica de referência.

O processamento dos dados teve como objectivos: 1) obter o mosaico do sinal de retrodispersão normalizado através das correções geométricas e radiométricas aplicadas pela ferramenta *Fledermaus Geocoder Toolbox* (Santos e Rodrigues, 2015); 2) obter um conjunto de camadas estatísticas relativas ao sinal de retrodispersão normalizado.

Neste trabalho serão apresentados apenas os resultados obtidos para a variância do sinal uma vez que permitem a localização dos objetos de uma forma mais expedita.

3. OCEAN REVIVAL

No parque de mergulho recreativo *Ocean Revival* localizado em Portimão, onde foram afundados quatro navios da Marinha Portuguesa, o ex-NRP "Zambeze", ex-NRP "Cte. Hermenegildo Capelo", ex-NRP "Oliveira e Carmo" e ex-NRP "Almeida Carvalho" (Fig. 1) foram adquiridos dados com o sondador multifeixe EM2040C, complementados com dados adquiridos pelos sistemas que tradicionalmente são utilizados na busca e deteção de objetos. Os resultados dos vários sistemas foram apresentados por Marques *et al*. (2014), que explorou os dados batimétricos de fundo e da coluna de água e por Fradique *et al*. (2014), descrevendo os resultados obtidos pelos sistemas de busca e deteção.

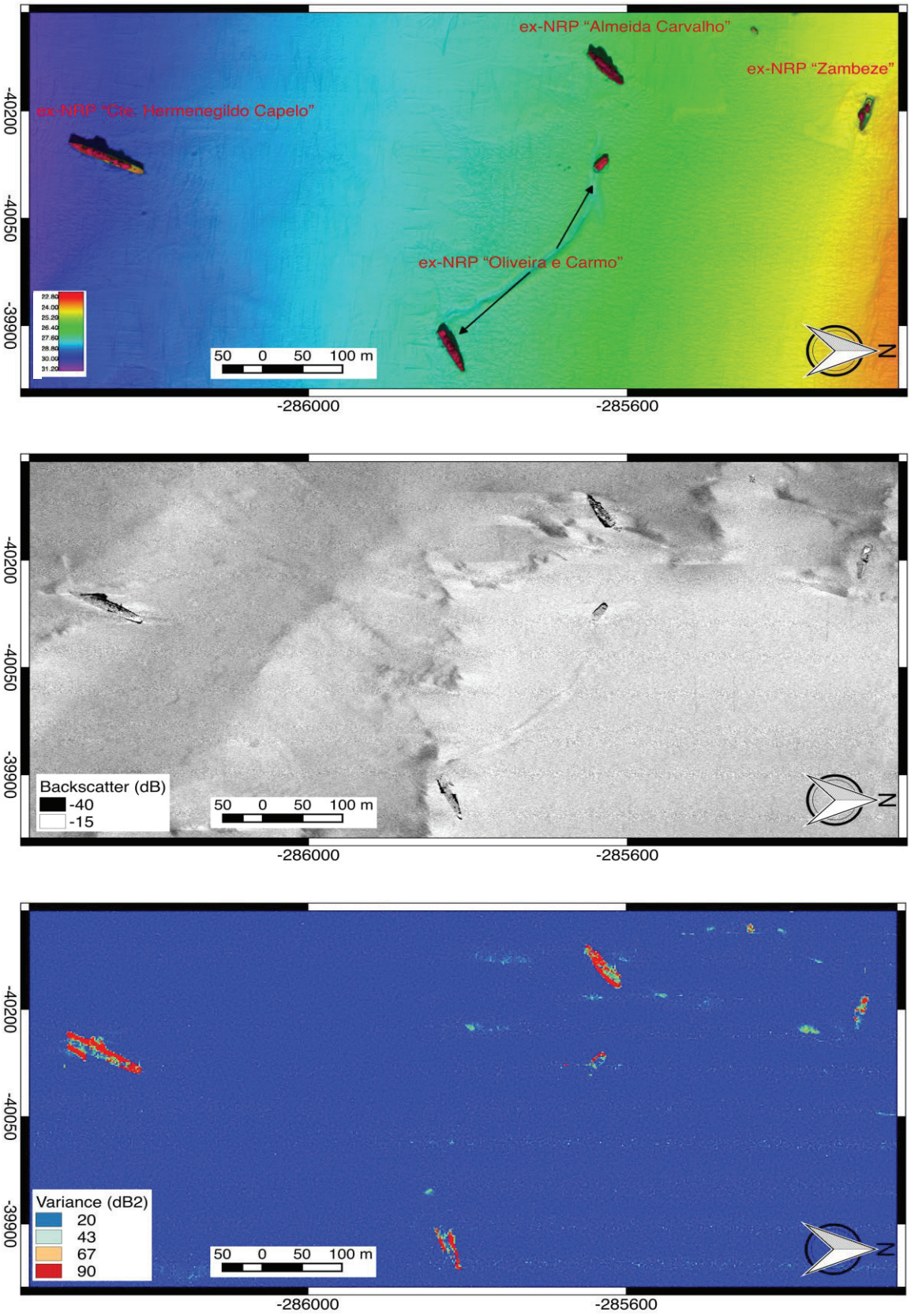


Fig. 1. Superfície batimétrica do parque OCEAN REVIVAL (no topo); sinal de retrodispersão normalizado (ao centro); variância do sinal de retrodispersão (em baixo).

Na figura 1 encontram-se representadas a superfície batimétrica, onde os navios surgem realçados em relação ao fundo marinho pela cor vermelha; o sinal de retrodispersão normalizado, onde os navios são visíveis através da diferença de dispersão entre os materiais do fundo e o material dos navios e, por fim, a variância do sinal de retrodispersão.

O mosaico do sinal de retrodispersão normalizado permite a deteção dos navios devido às distintas respostas acústicas dos materiais. Também é observado que a variância do sinal é elevada em zonas onde se verifica uma variação do sinal dentro de um determinado raio (10 vezes a dimensão do pixel do mosaico do sinal de retrodispersão). Estas variações devem-se principalmente à geometria de aquisição, ou seja, quando um objeto é observado de diferentes locais (fiadas distintas) são registadas zonas de sombra diferentes, provocando uma variância superior comparativamente ao fundo marinho. Avaliando a imagem da variância do sinal (Fig. 1), a localização dos navios é muito clara e não levanta qualquer dúvida.

Na figura 2 estão representados o sinal de retrodispersão normalizado e os respetivos modelos do ex-N.R.P. "Cte. Hermenegildo Capelo" (Figura 2-A) e do ex-N.R.P. "Almeida Carvalho" (Figura 2-B). Da comparação do sinal da retrodispersão obtido nos dois navios verificou-se uma diferença assinalável. Enquanto no caso do ex-N.R.P. "Cte. Hermenegildo Capelo" os resultados permitirem a identificação de grande parte das estruturas, o mesmo não se verifica no ex-N.R.P. "Almeida Carvalho". De acordo com Fradique et al. (2014), este último navio tem igualmente um comportamento distinto também no que se refere à assinatura magnética, tendo sido adiantadas razões relacionadas com a construção naval do navio. De qualquer forma, no que se refere à retrodispersão do sinal, as razões para a dificuldade encontrada ainda estão por apurar.

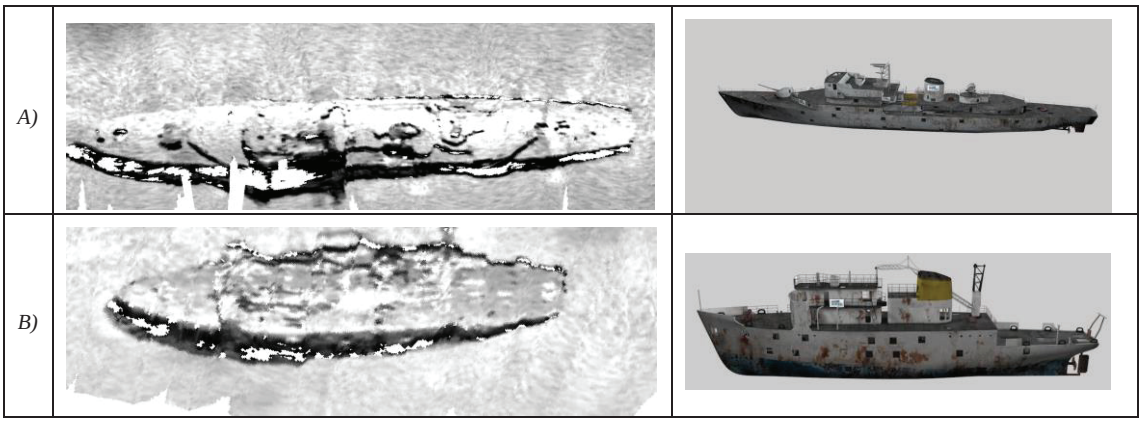


Fig. 2. A) sinal da retrodispersão normalizado e modelo do ex-N.R.P. "Cte. Hermenegildo Capelo"; B) sinal da retrodispersão normalizado e modelo do ex-N.R.P. "Almeida Carvalho". As imagens dos modelos foram retiradas de: Oceanrevival.org.

4. EX-N.R.P. "ROBERTO IVENS"

O caça minas ex-N.R.P. "Roberto Ivens" (Fig. 3) afundou-se em 1917 devido ao seu embate numa mina, durante a 1ª Guerra Mundial. Estando no fundo do mar, aproximadamente, há 99 anos, esperava-se que o material que constitui o seu casco tivesse sofrido alguma deterioração e que se verificasse algum grau de decomposição da sua estrutura, ou até que o navio se encontrasse parcialmente coberto por sedimentos, fauna e flora marinhas. Desta forma, as capacidades de detecção, utilizando o processamento do sinal de retrodispersão, não estavam garantidas, como no caso dos navios que se encontram no parque *Ocean Revival*.

No local de afundamento deste navio foram obtidas as superfícies batimétrica, de retrodispersão acústica e da variância do sinal acústico (Fig. 4). Da análise destas imagens é possível observar que: o navio está parcialmente coberto por sedimento, não apresentando contornos nítidos. A parte mais elevada do navio sobressai apenas 1 metro do fundo sedimentar.

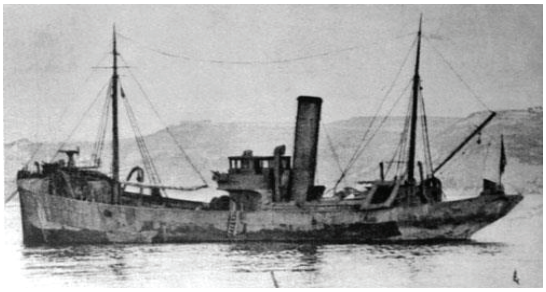


Fig. 3. Imagem do ex-N.R.P. "Roberto Ivens". Imagem retirada de: Orossio.pt.

O sinal de retrodispersão normalizado revela a mesma geometria identificada na superfície batimétrica, verificando-se que em redor do navio existem zonas de elevada e baixa retrodispersão (tons escuros). As zonas escuras podem ser provocadas por zonas de sombra devido à estrutura da própria embarcação. Na parte inferior da imagem da retrodispersão do sinal surge uma zona branca, indicando uma elevada retrodispersão,

provavelmente relacionada com a localização de parte do navio, que se partiu durante o embate com a mina.

Relativamente à imagem do valor da variância do sinal de retrodispersão, não obstante a falta de nitidez no contorno, é clara a localização do navio, dada pelas manchas de elevada variância.

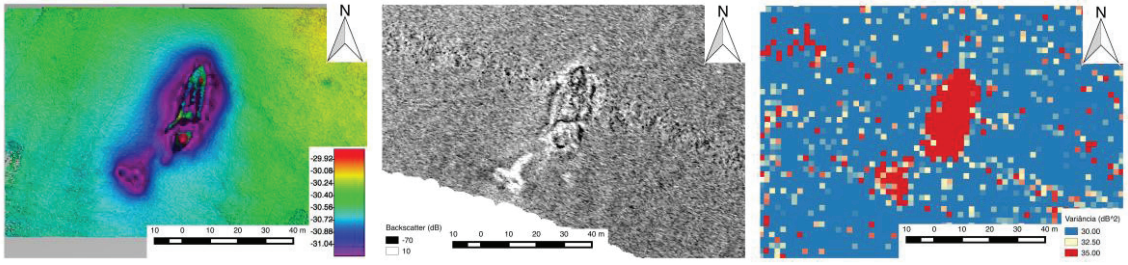


Fig. 4. Superfície batimétrica na zona do afundamento do ex-N.R.P "Roberto Ivens"(à esquerda);superfície com o sinal de retrodispersão normalizado (centro) e superfície com a variância do sinal de retrodispersão (à direita).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho ficou evidente que o sinal de retrodispersão adquirido por sistemas sondadores multifeixe pode ser utilizado na deteção de objetos, por permitir imagens de elevada resolução onde os objetos são visíveis. Comparando os resultados obtidos em objetos de diferentes estruturas e tempos de permanência no fundo do mar, conclui-se que, não obstante a degradação da intensidade do valor da retrodispersão acústica, os valores da variância do sinal permite, de forma expedita, assegurar a localização dos objetos, mesmo dos que apresentam reduzida expressão morfológica e, á partida, se encontram cobertos por fauna e flora marinhas.

REFERÊNCIAS

Fradique, C., Silva, S. e Ferreira, F. (2014). Busca e inspeção de objetos no fundo do mar – estudo de caso no parque Ocean Revival. *3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*.

Marques, C., Monteiro, C., Almeida, R. (2), Vicente, J. (2014). Busca e inspeção de objetos no fundo do mar – estudo de caso no parque Ocean Revival. *3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*.

Santos, R. e Rodrigues, A. (2015). Caracterização remota dos sedimentos marinhos para fins de cartografia sedimentológica através do algoritmo Angular Range Analysis. *VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*. Ordem dos Engenheiros. Amadora, Portugal.

Modelação física em canal da propagação de ondas na Praia da Galé, Algarve

A. Ramos (1), C.J.E.M.Fortes (2), J.M.P. Conde (3), S. Gabriel (4) e R. Reis (2)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, DHA-NPE; aramos@lnec.pt.

(2) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, DHA-NPE.

(3) UNIDEMI, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

(4) Universidade do Algarve / Laboratório Nacional de Engenharia Civil LNEC, DHA-NPE.

Resumo: Para a praia da Galé, Algarve, foram efetuados um conjunto de ensaios em modelo físico (canal de ondas) com o principal objetivo de analisar a hidrodinâmica da propagação de ondas sobre um fundo rochoso, para várias condições de agitação regular e irregular incidente. Efetuaram-se medições da elevação da superfície livre com sondas resistivas ao longo do canal e das componentes da velocidade com ADV, a meio da coluna de água em várias secções ao longo do canal. A evolução dos resultados ao longo do canal permite um melhor conhecimento do processo de propagação e contribui com dados para a validação de modelos numéricos.

Palavras-chave: Modelação física, praia da Galé, canal de ondas, análise temporal, análise espectral.

1. INTRODUÇÃO

A compreensão do comportamento da propagação de ondas em zonas onde os fundos são compostos por diversos substratos, é de uma importância fundamental para compreender os processos geomorfológicos que ocorrem em zonas costeiras, em particular, o caso da sua evolução em arribas.

São várias as ferramentas/metodologias que se podem utilizar para a caracterização das ondas nestas zonas. As medições realizadas in-situ permitem ter uma informação bastante precisa das características das ondas nestes locais. No entanto, têm limitações, porque usualmente são pontuais e limitadas no tempo. O recurso a modelos numéricos pode ser uma ferramenta bastante útil para definir espacialmente e no domínio do tempo as características das ondas nestes locais. Contudo, estas ferramentas também apresentam limitações relacionadas com as hipóteses que estão subjacentes às equações que resolvem, que condicionam a sua aplicação em situações de complexidade elevada e além disso, porque usualmente incluem um conjunto de parâmetros que têm de ser calibrados para cada zona de estudo.

A modelação física da propagação de ondas em fundos complexos e de profundidade variável constitui uma ferramenta fundamental para um melhor conhecimento e caracterização da forma como a onda se propaga nestas zonas.

Neste artigo apresentam-se alguns resultados do extenso conjunto de ensaios em modelo físico que foram realizados no canal de ondas COI3 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), para a análise da transformação de ondas sobre um fundo de batimetria complexas, sendo o caso de estudo um trecho da praia da Galé. Esta praia está localizada no Algarve, próximo de Albufeira, numa zona de costa caracterizada por ser relativamente rochosa (Fig. 1).

Apresentam-se as análises efetuadas aos dados experimentais obtidos da elevação da superfície livre e da velocidade recorrendo à análise temporal e espectral (*wavelets*). O recurso à técnica de *wavelets*, permite obter uma informação mais detalhada no que diz respeito à distribuição de energia associada a cada frequência. São obtidas também as distribuições bidimensionais das componentes da velocidade nos planos xy, xz e yz. É de salientar que a medição e posterior análise da velocidade com as metodologias indicadas, permite uma melhor compreensão de fenómenos que ocorrem aquando da propagação de ondas, que não são tão bem identificados com o recurso à análise da elevação da superficie livre.



Fig. 1. Área de estudo.

2. ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

2.1. Condições experimentais

Os ensaios foram realizados num canal com 32.50 m de comprimento útil, construído nos anos 50 do século XX, projetado com uma redução da área da secção transversal, de modo a melhorar o seu comportamento hidráulico, minimizando o aparecimento de ondas transversais indesejadas, em que na zona inicial, junto ao batedor, tem uma largura constante de 1 m, seguida de um troço

convergente e, finalmente, na zona final, com largura constante de 0.6 m. Atualmente está equipado com um gerador de ondas regulares/irregulares do tipo pistão, controlado por uma placa de conversão A/D ligada a um computador.

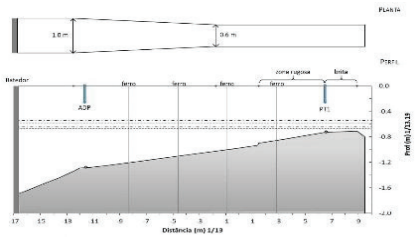


Fig. 3. Canal de ondas: planta (cima) e perfil longitudinal (baixo).

Foi implementado no canal um fundo que corresponde às características batimétricas verificadas num trecho da Praia da Galé, *i.e.* uma zona com 5 m de desenvolvimento e inclinação 1:12.71, seguida de uma zona com 13.5 m de desenvolvimento e inclinação 1:37 e por fim, uma zona rugosa, com 7 m de desenvolvimento e inclinação 2:59, que corresponde à zona rochosa em frente à arriba da Praia da Galé. A seguir a esta zona, foi colocada brita, de modo a absorver as ondas que aí chegam. A escala foi de 1:13.2 (Fig. 3).

2.2. Condições de agitação incidente

Os ensaios foram realizados para um nível de água, de 18 cm junto à pá do batedor, cerca de 2.4 m no protótipo. Com base nas características observadas in situ na Praia da Galé, foram selecionadas um conjunto de ondas de modo a serem simuladas em canal, nomeadamente combinações de agitação regulares (R) e irregulares (I) indicadas na Tabela 1. Cada ensaio teve uma duração útil de 240 s. Para as condições de agitação irregular, apenas foram ensaiadas aquelas em que, no caso da agitação regular, ocorria rebentação da onda.

Tabela I. Condições de agitação regular (R) e irregular (I).

T (s) / H (cm)	5.0	7.0	9.0	10.0	11.0
50	**R**	-	**R**	**R**	-
125	-	**R/I**	-	-	-
150	-	**R/I**	-	-	-
200	-	-	-	-	**R/I**

2.3. Equipamentos e técnicas de medição

Para cada condição de agitação incidente, foram realizadas medições da elevação da superfície ao longo do canal, recorrendo a um conjunto de 8 sondas resistivas alinhadas e espaçadas 20 cm entre si. Em todos os ensaios, colocou-se uma sonda junto ao batedor para confirmar a altura e período de onda que estava a ser gerado e uma sonda junto ao velocímetro acústico, ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*), para, conjuntamente com a velocidade das partículas, fosse medida a elevação da superfície livre (Fig. 4). Para medição das componentes das velocidades de partículas, recorreu-se a um ADV, que fornece as três componentes ortogonais da velocidade instantânea das partículas em suspensão na coluna de água, numa posição de análise. A frequência de aquisição para as sondas e ADV foi de 25 Hz.

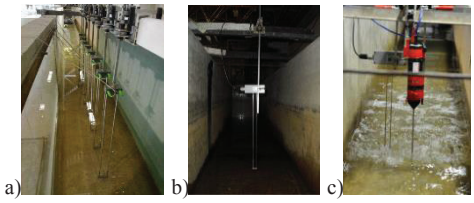


Fig. 4. a) Conjunto de 8 sondas de nível; b) Sonda de nível junto ao batedor; c) ADV e sonda de nível.

3. RESULTADOS

Para as diferentes condições de agitação ensaiadas, realizou-se uma análise temporal e espetral dos valores de elevação da superfície livre ao longo do canal e das componentes de velocidade das partículas ao longo do canal, no centro da coluna de água. O tratamento dos resultados baseou-se nos procedimentos apresentados em Fortes *et al.* (2010) e Ramos *et al.* (2013, 2014, 2015). Apenas são apresentados os resultados para os ensaios onde se verificou a rebentação da onda.

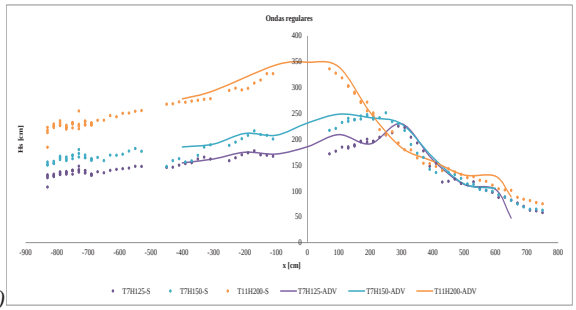
3.1. Análise temporal: elevação da superfície livre

A análise temporal permitiu determinar a altura significativa de onda, Hs, e o período significativo de onda, Ts, para as condições T7H125, T7H150 e T11H200 ao longo do canal, Figura 5. Na Tabela II apresenta-se o máximo valor de altura de onda significativa registada no canal, bem como a posição onde se verifica esse máximo.

Para todas as condições de agitação, constata-se que um aumento progressivo da altura significativa da onda devido ao efeito de empolamento até à posição onde se verifica a rebentação da onda, a partir do qual, existe um decréscimo significativo do valor. Para o mesmo período, verifica-se a rebentação de ondas mais cedo para a onda com maior altura de onda. Em contrapartida, o caso de teste associado a um período de 11 s e altura de onda gerada de 2 m, corresponde a uma rebentação da onda ainda mais cedo no canal, uma vez que a onda "sente" o fundo mais cedo. Em geral, a onda regular atinge valores mais elevados do que a onda irregular.

Quanto ao período de onda significativo, para o caso das ondas regulares, não existe uma diferença significativa, apenas uma ligeira variação, como consequência do empolamento da onda e do aparecimento de outros períodos de onda. Para o caso das ondas irregulares, constata-se que, após a posição onde ocorre rebentação, o valor do período de onda significativo aumenta progressivamente. Este aumento progressivo deve-se essencialmente às características não lineares e ao empolamento da onda.

a)



b)

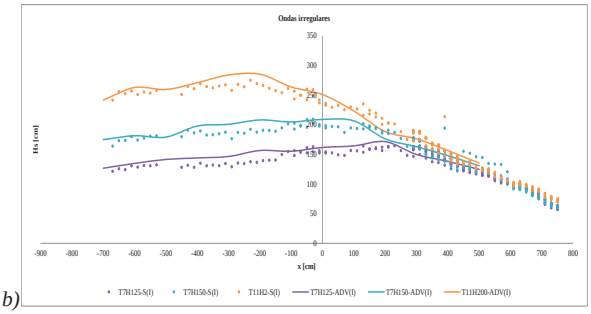


Fig. 5. Altura significativa de onda, T7H125, T7H150 e T11H200, Hs: a) Ondas regulares; b) Ondas irregulares.

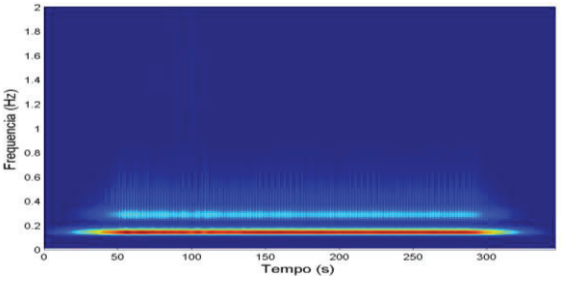
Tabela II. Altura de onda significativa máxima.

Caso	Ondas regulares		Ondas irregulares	
	Hs [cm]	X [cm]	Hs [cm]	X [cm]
T7H125	229.94	300	171.35	200
T7H150	248.45	100	208.88	0
T11H200	348.96	0	284.97	-200

3.2. Análise espectral: elevação da superfície livre

Com base nos valores da elevação da superfície livre, a análise espectral com recurso à técnica de *wavelets* permitiu determinar o período de onda de pico através do espetro de amplitude de frequências. Na Figura 6, apresentam-se os espetros para as posições onde foi registada a altura de onda significativa máxima para o caso T7H150, para ondas regulares e irregulares. Com estes espetros, é possível avaliar a análise dos efeitos transientes dentro da série temporal através da decomposição da série temporal no espaço frequência-tempo é possível identificar as frequências de oscilação e como é que essas frequências variam em amplitude ao longo do tempo. Dos resultados obtidos constata-se que, no caso das ondas regulares, existe uma predominância na frequência (de pico) onde ocorre a amplitude máxima, ao longo do ensaio, existindo ainda algumas harmónicas em redor de outras frequências (sensivelmente o dobro da frequência de pico), enquanto no caso das ondas irregulares, ao longo do ensaio não existe uma predominância em torno da frequência onde ocorre a amplitude máxima, verificando-se sim uma maior incidência em torno da frequência (de pico), em alguns instantes do ensaio. Dos dados apresentados na Tabela III, é ainda possível constatar que os valores obtidos para período de pico, são próximos do esperado, com exceção do ensaio de ondas irregulares, T11H200, no qual o período de pico situou-se nos 7.03 s.

a)



b)

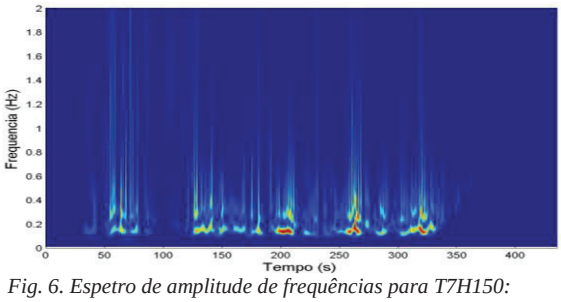


Fig. 6. Espetro de amplitude de frequências para T7H150: a) Ondas regulares; b) Ondas irregulares.

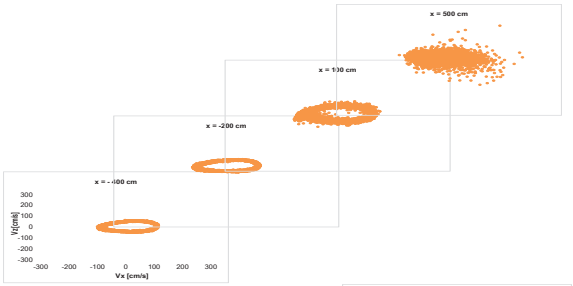
Tabela III – Frequência e período de onda de pico.

Caso	Ondas regulares		Ondas irregulares	
	f_{pico} [Hz]	T_p [s]	f_{pico} [Hz]	T_p [s]
T7H125	0.141	7.08	0.148	6.72
T7H150	0.142	7.03	0.148	6.72
T11H200	0.094	10.63	0.142	7.03

3.3 – Análise temporal: componentes de velocidade das partículas

Com base na medição das componentes das velocidades de partículas pelo ADV, foi possível determinar a distribuição bidimensional das componentes da velocidade no plano xz para as condições de ondas regulares T7H125, T7H150 e T11H200, Figura 7.

a)



b)

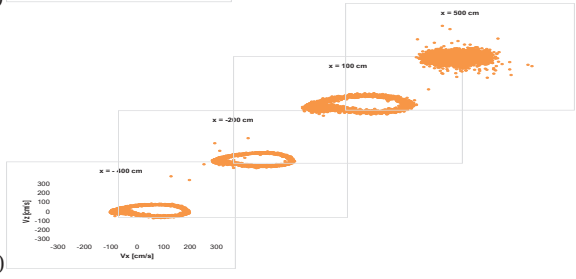


Fig. 7. Distribuição bidimensional das componentes da velocidade para o plano xz, nas secções x=-4m, -2m, 1m e 5m: a) T7H150;b) T11H200.

Para todas as condições de agitação constata-se que a trajectória das partículas é aproximadamente elíptica no início, verificando-se um aumento da dimensão da elipse devido ao aumento das velocidades (essencialmente associado à diminuição da profundidade ao longo do canal) e um desvio à forma elíptica consequência do desvio à teoria linear das ondas. A partir da secção onde se dá a rebentação, a trajectória das partículas é totalmente dispersa, consequência da dispersão de frequências que aí ocorre.

3.4 – Análise espectral: componentes de velocidade das partículas

Neste caso a técnica de *wavelets*, foi aplicada à serie temporal da velocidade de partículas, nomeadamente à sua componente longitudinal, V_x. Na Figura 8, apresentam-se os espetros para a posição onde foi registada a velocidade longitudinal máxima para ondas regulares e irregulares para o caso T7H150.

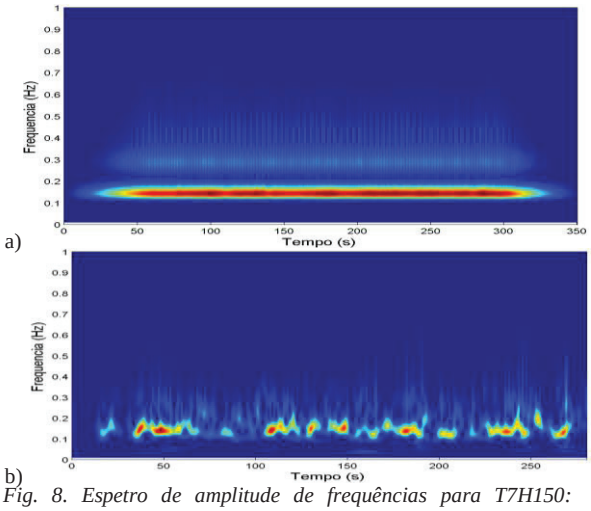


Fig. 8. Espetro de amplitude de frequências para T7H150: a)Ondas regulares; b) Ondas irregulares.

Foi possível verificar que, no caso das ondas regulares, existe uma predominância na frequência (de pico) onde ocorre a amplitude máxima, ao longo do ensaio (0.15 Hz para os ensaios T7H125 e T7H150 e 0.09 Hz para T11H200), existindo ainda algumas harmónicas em redor de outras frequências, sendo este aparecimento mais visível no caso do ensaio T11H200, onda com maior desvio à linearidade. Para as ondas irregulares o comportamento entre os diversos ensaios é semelhante, verificando-se que as maiores amplitudes estão associadas à frequência perto dos 0.15 Hz. Ao contrário do que ocorre para as ondas regulares, a amplitude associada às harmónicas é mais dispersa.

4. CONCLUSÕES

Dos resultados apresentados é possível concluir que, para as mesmas condições de ensaio, em relação à altura significativa de onda, em geral, a onda regular atinge valores mais elevados do que a onda irregular. Quanto ao período de onda significativo, no caso das ondas regulares, não existe uma diferença significativa ao longo do canal. Para o caso das ondas irregulares, após a posição onde ocorre rebentação, o valor do período de onda significativo aumenta progressivamente.

Da análise espectral da elevação da superfície livre, e da componente longitudinal da velocidade das partículas, constata-se que para os dois tipos de agitação (regular e irregular) o período de pico obtido é o expectável, com excepção do obtido no ensaio T11H200 para ondas irregulares, no qual o período de pico situou-se nos 7.03 s, tornando-se necessário a repetição dos ensaios para confirmação deste valor. Com recurso à técnica de *wavelets* é possível avaliar o andamento das frequências e da respectiva amplitude da onda ao longo do tempo. Se no caso da onda regular, tal não é muito importante pois o comportamento da frequência de pico e das harmónicas é constante ao longo do canal, o mesmo não se passa com a onda irregular aonde se verifica uma variação significativa da amplitude das frequências principal e harmónicas.

Quanto à distribuição bidimensional da velocidade, a trajectória das partículas é elíptica, até à posição onde se verifica a rebentação da onda, a partir da qual a trajectória passa a ser dispersa. A aplicação de um filtro e a rotação de eixos permitirá obter resultados melhores com o ADV. Do exposto, é de referir que o recurso ao ADV para medição e posterior análise da velocidade, permite uma caracterização do fluxo de propagação da onda mais detalhado (aceleração de partículas e coeficiente de reflexão) comparativamente com a caracterização obtida com a análise da elevação da superfície livre. No entanto, a análise da elevação da superficie livre e a análise da velocidade, são métodos que têm vantagens e desvantagens, pelo que devem ser utilizados em conjunto.

Agradecimentos

Agradecimento à FCT pelo financiamento concedido através dos projetos EROS–PTDC/CTE-GIX/111230/2009 e HYDRALAB+ e da bolsa de Selma Gabriel, SFRH/BD/64497/2009.

REFERÊNCIAS

Fortes, C.J.E.M.; Pinheiro, L.; Santos, J.A. (2010) - Análise temporal, espectral e de erros no pacote SOPRO. Aplicações. 10º Cong. da Água, Alvor.

Ramos, A.; Fortes, C.J.E.M. (2013) - Programa de análise espectral utilizando a função Wavelet. Rel. LNEC 374/2015.

Ramos, A.; Gabriel, S.; Fortes, C.J.E.M. (2014) - Análise temporal de registos da elevação da superfície livre e de velocidade em ensaios experimentais. Rel. HIDRALERTA 02/2014.

Ramos, A.; Pedro, F.; Bastos, M.A.; Lemos, R.; Reis, M.T.; Fortes, C.J.E.M. (2015) – Ensaios de Agitação da Praia da Vitória – Análise temporal, espectral e estatística. Rel. LNEC 284/2015.

MarinEye – A prototype for multitrophic oceanic monitoring

A. dos Santos (1), C. Magalhães (2), E. Silva (3,4), C. Bartilotti (1), C. Churro (1), S. Cotrim (1,7), R. Marques (1), A. Silva (1), S. M. Leandro (7), and the MarinEye project team

(1) IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Lisboa, Portugal. E-mail: antonina@ipma.pt.

(2) CIIMAR – Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental, Universidade do Porto, Portugal.

(3) INESC TEC – Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto, Porto, Portugal.

(4) ISEP – Escola de Engenharia, Instituto Politécnico do Porto, Porto, Portugal.

(5) Institute of Estuarine and Coastal Studies, University of Hull, Hull HU6 7RX, UK.

(6) FCUP – Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

(7) MARE – Centro de Ciências do Mar e do Ambiente, Escola Superior de Turismo e Tecnologia do Mar - Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, Portugal.

Abstract: MarinEye is an autonomous observatory system that integrates synchronized monitoring, both in space and time, of the chemical, physical, and biological components of the different trophic levels. The prototype will include sensors for the measurement of physical-chemical variables, a fraction filtration system to sample and preserve microplankton DNA/RNA, a high-resolution imaging system to measure the diversity and abundance of phyto- and zooplankton, an acoustic system to estimate the abundance of plankton and small pelagic fishes, and a hydrophone targeting the presence of marine mammals and anthropogenic sound. The developed technology for MarinEye will allow the observation and integrated interpretation of the different marine components, fundamental to the understanding of the complexity of the processes that influence the oceans stability, being the basis of an efficient system for the marine resources management. MarinEye will be validated in 3 oceanic monitoring observatories of the Portuguese coast: the RAIA, the BerlengasWatch and the CascaisWatch.

Key words: physical-chemical sensors, autonomous filtration system, high resolution imaging, plankton, technology.

1. INTRODUCTION

1.1. Project background

The world's oceans are central to the habitability of our planet, although there are still vast unexplored regions and ecosystems that have to be characterized in order to be protected. Nevertheless, the understanding of the complex exchanges among biological, chemical, physical, atmospheric, and geological processes in the ocean basins is still largely unknown and severely limited by the paucity of infrastructures able to support sustained and timely observations.

Linking the biological components of the pelagic ecosystems with their environment at a simultaneous time and space scale is essential to evaluate the environmental status of marine ecosystems.

The development of a more fundamental scientific understanding of these relationships requires new and technological approaches to the ocean observation. Integrative systems, such as MarinEye will therefore provide essential information on changes in biodiversity, impacts of/on climate change, detection of environmental anomalies, sustaining living marine resources, reducing the impacts of natural hazards and environmental changes.

1.2. Objectives

The present work aims to develop an autonomous system for integrated marine chemical, physical, and biological monitoring (Figure 1).

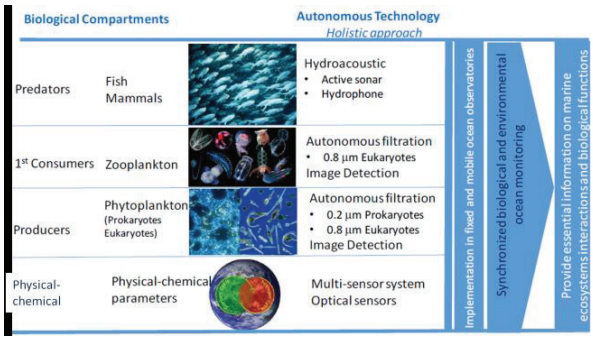


Fig. 1. MarinEye, concept and approach.

2. PROJECT DEVELOPMENT

To address the proposed objectives, MarinEye is organized in a total of seven work-packages (WP), all supporting and complementing each other in an overarching holistic approach. A bottom up organization has been used to link tasks that start with a lower level of complexity, until achieving the full objectives of the proposal.

The first four work-packages are: the physical-chemical modular multi-sensor system, the fraction filtration system, the high resolution imaging system and the underwater acoustic system. These work-packages deal with the requirements of the individual components of the autonomous system for marine integrated physical-chemical and biological monitoring and are currently being developed, tested and validated.

Within the first work-package, the multi-sensor system developed will provide information of the physical-chemical properties of the marine environment. The basic sensor setup includes a CTD (salinity and temperature), sensors for pH, dissolved oxygen (dO_2), as well as for dissolved CO_2 (dCO_2), still, the system architecture already embraces the possibility to include extra sensors. The dCO_2 sensor is based on a novel approach, since the measurement of this parameter is considered a key variable for ocean ecology, essential to evaluate the impacts of ocean acidification on marine ecosystems. Therefore, this novel sensor was integrated not only because of its relevance, but also to upgrade the technological approach.

The fraction filtration system developed in the second work-package will allow the collection of samples of planktonic organisms of different size fractions (> 0.2 µm for Prokaryotes and >0.8 µm for Eukaryotes), preserving them for further genomic (DNA and RNA) analysis. The system comprises a set of filters, automatically displayed, and used to concentrate planktonic samples under aseptic conditions. The system is capable of simultaneously filter multiple samples in parallel allowing sample replication, which are afterwards immersed in a DNA/RNA preserving fluid.

The third work-package, coordinated by IPMA, comprises an imaging system to assess the pelagic planktonic biodiversity *in situ*. This component assesses the pelagic community diversity and abundance, dominated by the phyto- and zooplankton communities in its different fractions. The imaging system is composed by dedicated cameras and optical setup coupled with synchronous illumination strobe. A 5Mpixel camera, together with a motorized zoom lens, will provide a 13 µm of pixel resolution and the possibility for multiple imaging options, capable of register a wide range of organisms' size. With the use of specific plankton identification software, based on the images acquired and taxonomy expertise, the system is able not only to quantify, but also to identify rare and abundant plankton taxa. The data obtained with the plankton imaging system will be validated by morphological and molecular techniques.

The fourth work-package will implement an underwater acoustic system that can be integrated in the autonomous multitrophic prototype, in order to target the higher levels of the trophic chain, namely fishes and mammals. It will be based on the multiple options of hardware and post-processing software available in the market.

There are an additional work-package dedicated to the integration of the individual components in a compact system that will be benchtop tested and validated to ensure that the different components function together in an unique compact system.

The data infra-structure and the software platform development were centralized in another work-package, which aims to integrate and analyze the data generated by the autonomous system.

Finally there is work-package that coordinate the project, the internal communication, as well as the dissemination of the activities and results obtained.

3. PROJECT OUTPUT AND OUTCOME

MarinEye will increase the ocean knowledge, complementing the information from existing observatories by providing novel integrative data that are not currently supplied. It has the potential to considerably increase the national marine environmental monitoring of coastal, remote and ocean protected areas by providing long-term biological surveillance capabilities and synchronize contextualized environmental data. It will be installed in several marine observatories, namely in the Cascais Watch station (a coastal upwelling area), in the Berlengas Watch station (a marine protected area), and in the fixed platform of RAIA (an oceanic observatory of the Iberian Margin).

MarinEye will also give an extremely important contribution for the consolidation of infrastructures dedicated to the observation of the marine environment, implementing adaptive management approaches, as the European Union Marine Strategy Framework Directive (EU-MSDF, European Commission 2008), and allowing the development of strategies for the continuous assessment of the marine waters Good Environmental Status (GES).

4. PROTOTYPE AND ITS COMPONENTS

The autonomous monitoring system consists of several modules, each particularly conceived to a specific oceanic compartment (Figure 2).

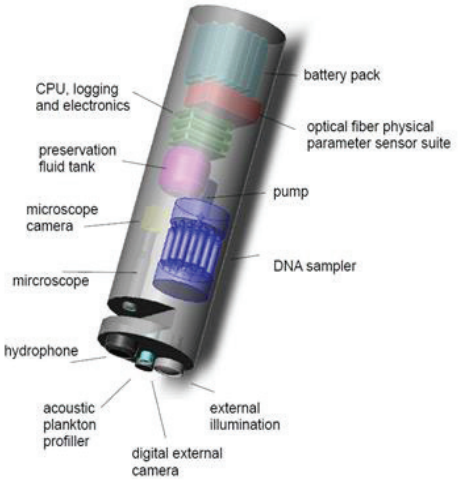


Fig. 2. MarinEye prototype and its components.

The MarinEye is combining different technologies in a modular, compact system that can be deployed on fixed or mobile platforms. The data acquisition system will include *in situ* plankton-imaging device (targeting plankton), an active sonar (targeting plankton and small pelagic fishes), a hydrophone (targeting mammals and anthropogenic sound), a bio-sampler filtration system (targeting prokaryotes and unicellular eukaryotes), and multi-sensors system (for physical-chemical variables such as salinity, dCO2, dO2, temperature and pH).

Acknowledgments

The authors acknowledge the financial support from Iceland, Liechtenstein and Norway through the EEA Grants (PT02_Aviso4_0017).

REFERENCES

European Commission (2008). Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008, establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). *Official Journal of the European Union* L164, 19–40.

A Navigation System for the LUSO ROV

P. Abreu (1), A. Calado (2), P. Madureira (2), A. Pascoal (1), J. Ribeiro (1), M. Ribeiro (1), L. Sebastião (1), H. Silva (1)

(1) Institute for Systems and Robotics (ISR), Instituto Superior Técnico, University of Lisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal. pedro.caldeira@ist.utl.pt.

(2) Estrutura de Missão para a Extensão da Plataforma Continental (EMEPC), Rua Costa Pinto, N.º 165, 2770-047 Paço de Arcos – Portugal.

Abstract: The LUSO ROV (Remotely Operated Vehicle) is operated by the EMEPC (Task Group for the Extension of the Continental Shelf) as a tool to study and gather geological and biological samples in the deep ocean, down to *6000 m* depth. Up until recently, the pilots in charge of operating LUSO depended for the most part on noisy, infrequent Ultra-Short Baseline (USBL) fixes to obtain estimates of the position of the ROV (on-board the support vessel), which are crucial for remote operation of the underwater vehicle. The need for reliable, continuous estimates of the ROV position led to a partnership between EMEPC and the Instituto Superior Técnico (IST). Researchers from IST were challenged to contribute to the development of a navigation system for LUSO using several of the ROV's sensors, such as USBL, DVL (Doppler Velocity Log) and AHRS (Attitude and Heading Reference System) to provide the intended continuous estimates of position. This paper gives an overview of the design and testing of the resulting navigation system developed in close cooperation with the EMEPC, which provided the required logistics and the LUSO ROV as an advanced test tool.

Keywords: Underwater navigation, remotely operated vehicles, LUSO ROV.

1. INTRODUCTION

The EMEPC is a Portuguese governmental structure that was assigned the mission of preparing a proposal for the extension of the continental shelf of Portugal, in accordance with the United Nations Convention on the Law of the Sea. The work involved in the process includes the study of geological and hydrographical features of the seabed off the coast of Portuguese mainland and islands, see http://www.emepc.pt/en/. ROVs are widely used for gathering scientific samples from deep water sites. The LUSO, shown in fig. 1, is the ROV used by EMEPC to help accomplish its scientific goals.

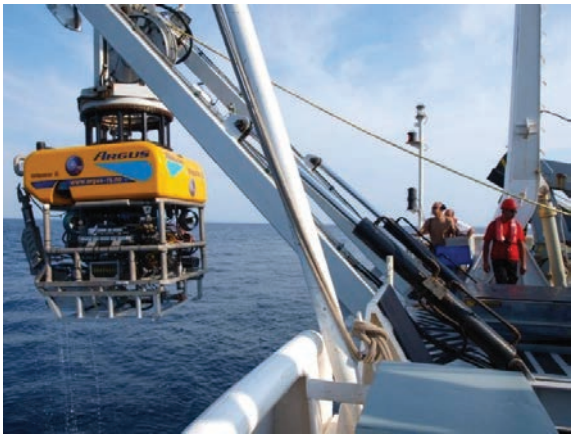


Fig. 1. Deploying the LUSO from a support vessel.

LUSO is deployed from a ship and operated onboard from a mission control room, where the operators have access to a number of screens displaying relevant information, regarding both the ROV (e.g. position, attitude, and camera stream) and the ship (GPS position and attitude). The operators then control the ROV thrusters, sensors, several sampling devices and two hydraulic arms that can be used to grab samples, or interact with the environment in general. Figure 2 shows the mission control room.

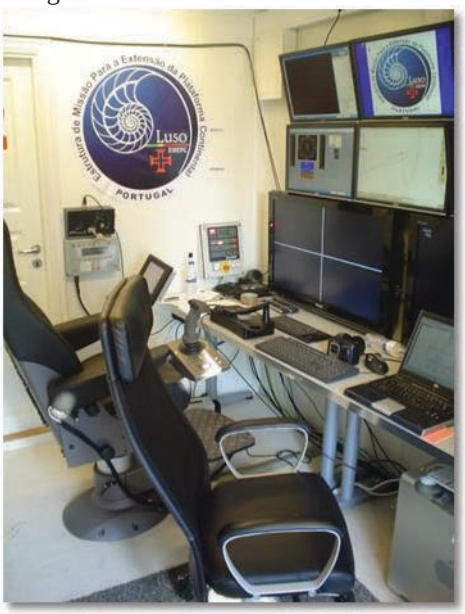


Fig. 2. The mission control room onboard the support vessel.

This paper describes a navigation system designed by IST (Instituto Superior Técnico), in close cooperation with the EMPEC to improve the quality

of the estimated position of the ROV displayed to the pilots. The reader is referred to (Kinsey *et al.*, 2006) and the references therein for an introduction to navigation systems design, with applications to autonomous underwater vehicles.

2. USBL POSITIONING

The position of the ROV displayed on a console in the control room is obtained from a USBL (Ultra-Short Baseline) placed at a known position on the ship. At regular intervals, the ROV transponder is triggered to emit an acoustic ping which propagates through water and is detected by the USBL receiver, which estimates the direction of arrival and the travel time of the signal and converts these data into distance, bearing and elevation measurements. By combining this information with the GPS position and the attitude of the ship, these measurements can then be used to estimate the global position of the ROV.

A shortcoming of this system is that USBL fixes (measurements of the arrival signal) are noisy, infrequent, and unreliable – the detection of the acoustic signal on the ship can fail for a number of reasons, such as no line-of-sight between the acoustic pinger onboard the ROV and the USBL onboard the ship. Additionally, by displaying only the position fixes obtained by the USBL one discards other, potentially useful sensors installed on the ROV, namely DVL (Doppler Velocity Log) and an attitude unit. In fact, the DVL can measure the velocity vector of the ROV with respect to the water and to the seabed, if within appropriate altitude intervals.

The main challenge was to develop a navigation system that could provide a reliable, continuous position estimate to the ROV operators, preferably making use of the DVL and the attitude unit, without requiring additional expensive sensors or navigation systems.

3. NAVIGATION SYSTEM SOFTWARE

The software of the navigation system developed was provided in an Intel NUC computer (fig. 3), which receives data from the necessary sensors and outputs the necessary estimates to be displayed in the control room. This section describes the software designed by IST, including a simple Kalman Filter (KF) and a few other functionalities that include proper initialization using the GPS position of the ship when the ROV is launched, sensor timeouts that include: i) proper initialization using the GPS position of the ship when the ROV is launched, ii) sensor timeouts that stop the process of outputting the estimates of relevant motion-related variables when no longer reliable, and iii) proper recovery from sensor timeouts.



Fig. 3. The compact NUC computer installed in the control room.

3.1 Operational conditions

Figure 4 shows a set of measurements usually available at different altitude and depth intervals. DVL water track measurements (velocity of the ROV with respect to the water) are usually available along the entire water column except when too close (less than around 10 m) to the seabed. DVL bottom track measurements (velocity of the ROV with respect to the bottom) are available only when close enough to the bottom, usually when the altitude is less than 30 m. USBL fixes, when other sources of failure such as no line-of-sight are excluded, provides measurements along the entire water column except when too close (less than around 10 m) to the surface.

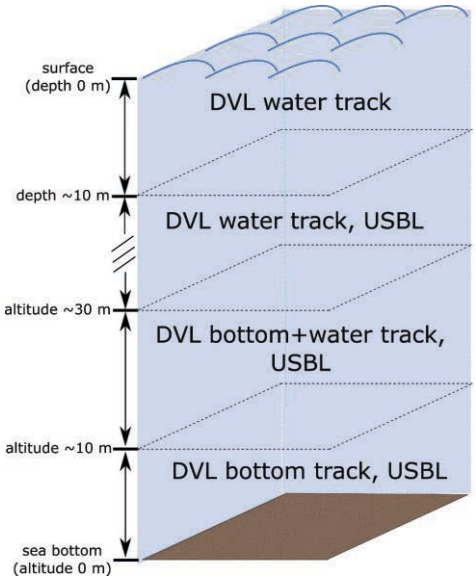


Fig. 4. Altitude and depth conditions where each sensor provides valid measurements.

3.2 Kalman filter design model

To simplify implementation and avoid robustness issues during critical operations, we chose to resort to a simple, linear filter design model where the ocean current was assumed constant and the vehicle acceleration unknown (no acceleration measurements used). These assumptions yield the following simple linear model, where process and observation Gaussian noises were added:

$$\dot{\boldsymbol{p}} = \boldsymbol{v}$$
$$\dot{\boldsymbol{v}} = \boldsymbol{0}$$
$$\dot{\boldsymbol{v}}_c = \boldsymbol{0}$$

where $\boldsymbol{p}$ is the ROV's 2D position vector in a global, North-East frame, and $\boldsymbol{v}$ and $\boldsymbol{v}_c$ are the vehicle and ocean current velocity vectors, respectively in that same frame. Given the above model, the discrete-time one (also written here without the noise terms) is given by

$$\boldsymbol{x}(k+1) = A\,\boldsymbol{x}(k)$$
$$\boldsymbol{y}_{USBL}(k) = C_{USBL}\,\boldsymbol{x}(k)$$
$$\boldsymbol{y}_{wtrack}(k) = C_{wtrack}\,\boldsymbol{x}(k)$$
$$\boldsymbol{y}_{btrack}(k) = C_{btrack}\,\boldsymbol{x}(k)$$

where

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{p}^T & \boldsymbol{v}^T & \boldsymbol{v}_c^T\end{bmatrix}^T$$
$$A = \begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{2\times2} & \Delta t\,\boldsymbol{I}_{2\times2} & \boldsymbol{0}_{2\times2} \\ \boldsymbol{0}_{2\times2} & \boldsymbol{I}_{2\times2} & \boldsymbol{0}_{2\times2} \\ \boldsymbol{0}_{2\times2} & \boldsymbol{0}_{2\times2} & \boldsymbol{I}_{2\times2}\end{bmatrix}$$
$$C_{USBL} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{2\times2} & \boldsymbol{0}_{2\times2} & \boldsymbol{0}_{2\times2}\end{bmatrix}$$
$$C_{wtrack} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{0}_{2\times2} & \boldsymbol{I}_{2\times2} & -\boldsymbol{I}_{2\times2}\end{bmatrix}$$
$$C_{btrack} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{0}_{2\times2} & \boldsymbol{I}_{2\times2} & \boldsymbol{0}_{2\times2}\end{bmatrix}$$

The above model, with the proper process and observation noise terms inserted, was the starting point for the design of a Kalman filter to merge the sensorial information available on-board the support vessel and yield ROV position and velocity estimates. The methodology adopted is by now standard, see (Grewal and Andrews, 2015).

3.3 Overview of the software architecture

Besides the basic Kalman Filter functionalities (predict and update the estimates), a number of extra features were included:

- "First initialization": when the ROV is deployed, its position is initialized at the stern of the support ship;
- Sensor timeouts: stop producing position estimates when (combinations of) sensors fail for a given time period;
- Recover from timeout: reset the KF using the first USBL fix after timeout;
- Compensation of the USBL delay: keep a buffer of the measurements and their time stamps, to properly compensate for delayed USBL fixes (due to propagation time through water).

4. EXPERIMENTAL RESULTS

The development phase of the LUSO ROV navigation system was completed and the experimental set-up was tested during a campaign at sea in June 2015, with promising results. Figure 5 shows the estimated trajectory produced by the estimator (continuous blue line) and position and heading (icon) of the ROV, as well as the position and heading of the ship, along with the USBL fixes (red dots) on IST's display console. The results show the efficacy of the navigation system in providing reliable, frequent information on the LUSO´s position underwater. This is expected to have a very positive impact on its performance during challenging scientific missions.

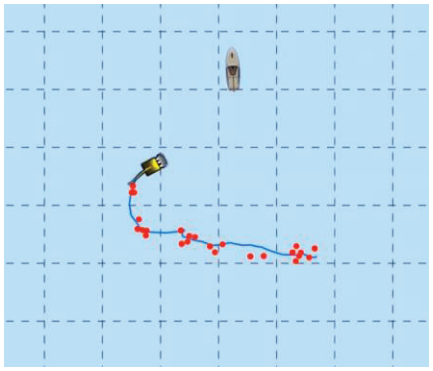


Fig. 5. Estimated trajectory and USBL fixes shown on a control console.

Additionally, figure 6 shows the full estimated trajectory during a 1500 m dive, along with the USBL fixes obtained. Figure 7 shows the position residuals, i.e. the differences between the USBL fixes at the time they are obtained and the estimated position vectors. These residual vectors are centered at the origin, as expected.

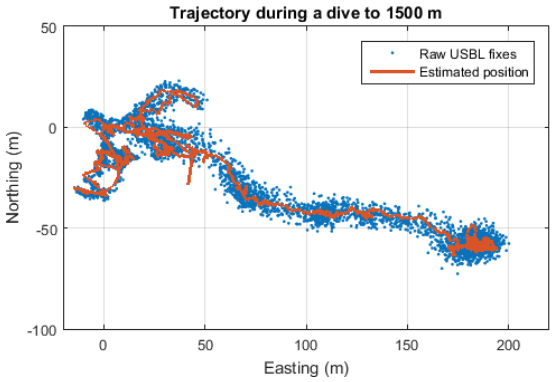


Fig. 6. Estimated trajectory and USBL fixes.

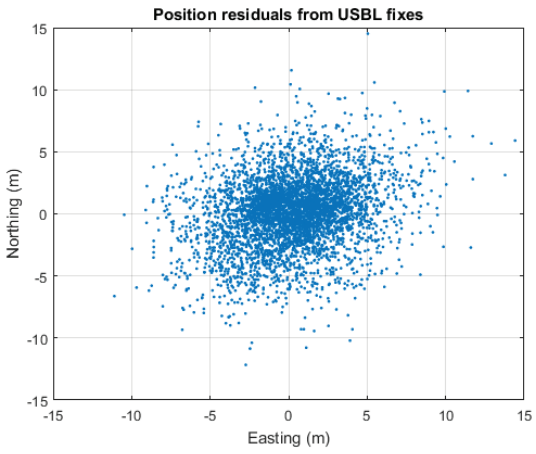


Fig. 7. Position residuals from USBL fixes.

5. CONCLUSIONS

The work presented showed how a navigation system was designed, implemented and integrated on the LUSO ROV. The system consisted of a Kalman filter estimator that uses measurements from an USBL, a DVL and an attitude unit, as well as several other extra features that were found to be convenient during the usual operations. Despite its simplicity, this system significantly improved the information that the LUSO ROV operators have regarding its position and attitude. Possibilities for future work include adding additional features, such as covariance-based "sensor timeouts".

Acknowledgements

We gratefully acknowledge the contributions of our colleagues at ISR/IST, who spared no effort to enable the transition from the laboratory to the real world. A special word of gratitude goes to the EMEPC team for their enthusiasm, unfailing support, team spirit, and vision of what it takes to have the "perfect" ROV.

REFERENCES

J. Kinsey, R. M. Eustice, and L. L. Whitcomb, "A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges," in *Proc. IFAC Conf. Manoeuvering Control Marine Craft*, Sep. 2006, pp. 1–12.

M. Grewal and A. Andrews, *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*, 4th Edition, 2015, Wiley-IEEE Press.

EMEPC: http://www.emepc.pt/en/.

Networked Marine Vehicles for Reflection Seismic Surveying: the EC WiMUST Project

P. Abreu (1), A. Pascoal (1), J. Ribeiro (1), M. Ribeiro (1), L. Sebastião (1), H. Silva (1)

(1) Institute for Systems and Robotics (ISR), Instituto Superior Técnico, University of Lisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal. Contact email: pedro.caldeira@ist.utl.pt.

Abstract: Reflection seismology techniques are routinely used to estimate the properties of the Earth's subsurface using reflected seismic waves. For geotechnical surveying purposes, the techniques rely on the emission of powerful acoustic signals that penetrate the seafloor, reflect or refract off geological features, and travel back to multiple acoustic receivers, or hydrophones. The hydrophones are often placed along long cables, or streamers, usually towed by vessels. In this context, the EC WiMUST project brings together a consortium of five companies and four research institutes that advance an innovative concept whereby shorter streamers are towed by autonomous marine vehicles (instead of a support vessel). The vehicle/streamer ensembles can thus be viewed as a large acoustic array, the geometry of which can be changed by controlling the overall vehicle formation. We describe the involvement of the Instituto Superior Técnico (IST) in the WiMUST project, namely in what concerns the design, implementation, and testing of cooperative networked navigation and control systems for multiple marine vehicle formation-keeping operations and show the progress achieved during the first year of activity.

Keywords: Autonomous underwater vehicles, formation control, cooperative control, cooperative navigation.

1. INTRODUCTION

Reflection seismology is a method of exploration geophysics that aims to estimate the physical properties of the Earth's subsurface using acoustic waves reflected off geological features. Geotechnical surveys using this method usually involve one or more sources emitting powerful acoustic signals at regular intervals, which penetrate the subsurface, reflect and refract, and are then recorded on multiple acoustic receivers. In the case of offshore surveys, usually, a vessel tows one or more acoustic source(s) and *streamers*, that is, carefully trimmed long cables containing acoustic receivers (hydrophones) at specified intervals. Both the source and the streamers are towed very close to the sea surface. These surveys can become operationally cumbersome because the long streamers can get entangled, thus impacting negatively on vessel time and incurring extra costs. Additionally, lateral currents can make the streamers curve towards one of the sides when towed, effectively making it very hard to control the position of the segments of each streamer - and in consequence the hydrophones - that are farther away from the vessel, an effect usually called *feathering*. The EC WiMUST (Widely scalable Mobile Underwater Sonar Technology, http://wimust.isme.unige.it/) project, funded by the European Commission, proposes a significant change in the way these surveys are carried out: the vessel should tow only the acoustic source(s), while the long streamers are replaced by shorter ones towed by AUVs (autonomous underwater vehicles), as illustrated conceptually in figure 1. The use of the system that is proposed to tow the streamers holds potential benefit both by simplifying and automating the operations required to maintain the necessary geometry (through geometric formation control of the AUVs) and by allowing the geometry of the formation itself to be adapted online, including its depth - see for example (Indiveri and Gomes, 2014), (Al-Khatib *et al.*, 2015) and the references therein for fast paced descriptions of the project.

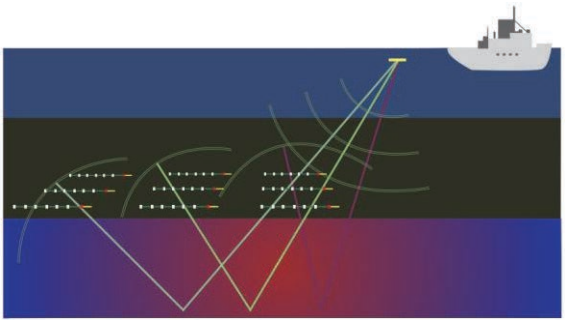


Fig. 1. Illustration of the concept proposed in the EC WiMUST Project.

In this paper we examine briefly two problems that are at the core of the work pursued at IST in the scope of the WiMUST project: i) developing *cooperative navigation* algorithms that allow AUVs to estimate their own position, and ii) analyzing possible *cooperative control* laws that can steer the formation of vehicles so as to meet the survey objectives. Ongoing developments on both fronts rely strongly on and expand previously-proposed

approaches, both by IST and the other partners in the consortium.

The paper is organized as follows. Section 2 is devoted to cooperative navigation. Section 3 addresses cooperative control. The latter section concludes with a brief description of tests carried out with the Medusa-class autonomous marine vehicles that are property of IST.

2. COOPERATIVE NAVIGATION

The techniques used to infer physical properties of the subsurface based on the acoustic signals recorded by the hydrophones require accurate knowledge of the positions of the hydrophones at the times of reception. In conventional survey procedures, the streamers are towed close to the surface and GPS antennas can be placed on both ends of the streamers. The position of the hydrophones is then estimated by assuming that the streamer is extended between the two ends, and using the known distances between hydrophones along the streamer. Additionally, when operating underwater the AUVs themselves need a navigation system to be able to properly maintain their formation. Since one of the possibilities proposed in the scope of WiMUST is that the streamers can be towed at considerable depths, a scalable (preferably independent on the number of AUVs used) and accurate strategy for AUV positioning is necessary, both for proper formation-keeping of the AUVs and for estimation of the positions of the hydrophones placed along the streamers.

2.1 Cooperative acoustic positioning scheme

During the first year of the project, the consortium developed a positioning strategy whereby two or more nodes at the surface, usually called *anchors* (which can be autonomous vehicles), are equipped with acoustic modems and ping cyclically at regular intervals and broadcast their GPS position. The AUVs operating underwater are also equipped with acoustic modems with accurately-synchronized clocks (using atomic clock technology) and can measure the travel time of these acoustic pings and convert them into distance measurements. In general, for *n* anchor vehicles, the procedure can be summarized as follows

- On time slot 1, surface agent 1 pings and broadcasts a data packet containing its position at the time of the ping, estimated from GPS, in a conveniently-defined local Earth-fixed frame.
- All AUVs receive the ping, decode the data packet to obtain the position of agent 1 at the time of the ping, and compute their distances to that position.
- On time slot 2, surface agent 2 pings in the same way agent 1 had pinged. Again, all AUVs obtain the position of agent 2 at the time of the ping and their distances to that position.
- The procedure continues until all *n* anchors have pinged, and then a new cycle starts over from step 1.

After a properly chosen interval of time, each AUV will have obtained a collection of:

- *n* distance measurements between the vehicle and anchor positions $\boldsymbol{p}'_1$ to $\boldsymbol{p}'_n$, denoted r_1 to r_n, acquired at *n* times t_1 to t_n;
- *n-1* (possibly rough) estimates of displacement vectors relative to the water between consecutive pings, $\boldsymbol{d}_1$ to $\boldsymbol{d}_{n-1}$, by integrating speed measurements with respect to the water (that is, using *odometry)*.

2.2 The navigation system

The scheme described previously affords each AUV information that needs to be incorporated in a navigation system to provide online estimates of the global position of the AUV. To this end, IST developed and is currently testing a probabilistic scheme, where each range and odometry measurements are assumed to be affected by zero-mean Gaussian noise with known characteristics. The navigation system then computes the maximum likelihood estimate of the AUV positions at the time instants of the last *k* range measurements, similarly to what was proposed in (Eustice et al., 2011). In short, this amounts to solving the non-convex, non-linear weighted least-squares problem

$$\hat{\boldsymbol{p}} = \hat{\boldsymbol{p}}_1, \ldots, \hat{\boldsymbol{p}}_n = \arg\min_{\boldsymbol{p}} J_r + J_d$$

where J_r and J_d are the cost functions corresponding to range and odometry mismatches respectively, given by

$$J_r = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{r_i - \boldsymbol{p}_i - \boldsymbol{p}'_i}{\sigma_r}\right)^2,$$

$$J_d = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n-1}\left[d_i - (\boldsymbol{p}_{i+1} - \boldsymbol{p}_i)\right]^T \Sigma_d^{-1}\left[d_i - (\boldsymbol{p}_{i+1} - \boldsymbol{p}_i)\right].$$

respectively, where σ_r is the range measurement error covariance and Σ_d is the odometry measurement error covariance. The estimate of the position at the current time *t* is then obtained from the estimate of the position at the time of the last range measurement by adding the odometry measurements since then. The problem setting can be easily extended to allow online estimation of the ocean current velocity.

In practice, there are efficient software packages that can solve this problem in an online, real-time setting. We use a moving window approach where each optimization problem usually uses the last *k=20* range measurements and the *k-1=19* odometry measurements. To minimize the chance that the

solver converges to a local, non-global minimum, a threshold on the optimization cost is set such that if the solution obtained has a cost higher than the threshold, the solver is restarted from a different initial estimate. A timeout mechanism ensures that this procedure does not continue indefinitely - after a given time the solver assumes that a good solution cannot be found and returns a message accordingly.

2.3 Tests and results

Preliminary tests using this navigation algorithm have been carried out, mainly to assess the possibility of depending on this optimization-based strategy to localize in real-time. The setup consisted of 2 anchors and one AUV running the proposed algorithm. The results showed very good promise for applications. Figure 2 shows the range residuals computed when a new range measurement and anchor position arrive at the navigation system of an AUV, i.e. the difference between the expected and measured range to the anchor position.

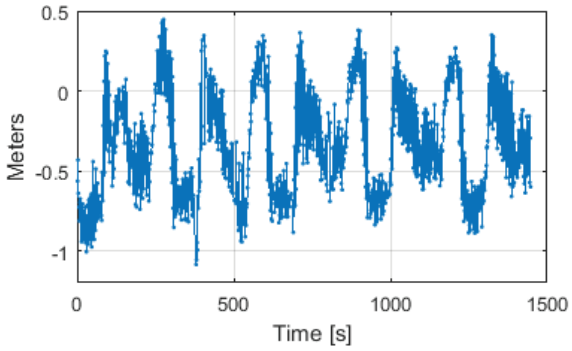


Fig. 2. Range residuals.

3. COOPERATIVE CONTROL

Assuming all AUVs have access to accurate estimates of their positions, the control problem of achieving and keeping a geometry formation relative to the acoustic source (carried for example by a surface vessel or even an autonomous vehicle) remains to be solved. Although the control strategy to be used in the final demonstration of the project is yet to be decided, several techniques have been analysed and their applicability scenarios identified. Here, we briefly describe two of these types of algorithms: target tracking and cooperative path-following.

3.1 Target Tracking

The target tracking approach is based on the idea that each vehicle should generate its own virtual target given information obtained from a leader vehicle, or agent, and then attempt to track it. Considering the particular setup of WiMUST, one way of applying this type of algorithm to the AUVs to achieve formation-keeping would be as follows:

- Periodically broadcast from the surface to the AUVs the position of the acoustic source and some additional information about its motion (e.g. velocity vector);
- Each AUV receives this information, applies a smoothing algorithm to the data concerning the motion of the acoustic source, to obtain a continuous, structured path (e.g. one composed only of straight lines and circular arcs);
- Each AUV has its own formation parameters based on along-path and across-path offsets which define the position of its virtual target (e.g. AUV *1* should be 10 m behind and 2 m to the left of the acoustic source);
- Each AUV tracks its own virtual target.

Given this very simple scheme, if we consider that each AUV can track its own virtual target reasonably and if the formation parameters are properly selected, we expect the formation to be achieved and maintained. Two advantages of this algorithm are that it is simple and it does not require any information exchange between vehicles – which is important in underwater scenarios given the impossibility of simultaneous underwater acoustic communications. A clear disadvantage is that the lack of communication between AUVs implies that the vehicles are not aware of the motion of their neighbors, possibly leading to collisions or poor formation-keeping if some of the vehicles cannot properly track their virtual targets temporarily.

3.2 Cooperative Path-Following

A second type of algorithms that can be applied is based on the idea that all AUVs have knowledge of the path of the acoustic source (that could be produced by the same kind of smoother algorithm previously described) and also have virtual targets that move along the prescribed paths at a prescribed speed, but not simply based on the motion of the acoustic source. Instead, the motion of the virtual target of one AUV may depend on the acoustic source and on the positions of the virtual targets of the remaining AUVs. This type of strategy can be used to achieve coordination along the paths followed by the AUVs, so that even if one element of the fleet cannot move fast enough, the others will slow down to try to synchronize their positions - see for example (Ghabcheloo *et al.*, 2009) and the references therein for an introduction to cooperative path following techniques.

The additional robustness and awareness of the motion of the entire fleet is a clear advantage of cooperative path-following strategies. However, the information exchange required (AUVs must broadcast, for example, an along-path coordinate of the current position of their virtual targets) may preclude this type of strategy from being applied in an underwater setting. Additionally, the acoustic source cannot be seen directly as one element of the formation since it is, in general, non-cooperative – in the sense that it is towed by a human-piloted vessel

that will not adapt its motion in real-time, in response to what the AUVs are doing. However, a particular scenario where this kind of algorithms (or even more complex ones) could be used is a mission where all vehicles move at the surface. In that case, WiFi communications enable heavy data exchange among AUVs.

3.3 Tests and results

The strategy proposed in section 3.1 has been recently tested using MEDUSA vehicles, developed at IST (see fig. 3).



Fig. 3. One of the MEDUSA vehicles developed at IST.

The setup consisted of a small human-piloted vessel with GPS and WiFi antennas and two AUVs moving at the surface, tracking the human-piloted vessel at given along- and across-path offsets. All communications from the vessel to the AUVs resorted to WiFi. A path smoother was used to approximate the sequence of GPS positions of the vessel by a continuous path composed of straight lines and arcs. The results showed that the performance was good and the vehicles tracked the expected trajectories. Figure 4 shows these trajectories at the end of a mission, with the path of the human-piloted vessel in white and those of the AUVs in red and white. The AUVs were configured to follow the vessel 10 m behind, 2 m to the side (one to the left and one to the right).



Fig. 4. Trajectories of the vessel (yellow) and the two AUVs (red and white).

4. CONCLUSIONS

This paper showed the steps taken and results achieved by IST in the first year of the WiMUST project regarding cooperative navigation and control of a fleet of Autonomous Marine Vehicles. The results are very promising and give good indications for the next two years of the project. Future work will focus on extensive testing and tuning of the proposed navigation strategy, and further investigation of control strategies and their applications to different scenarios. Integration trials with multiple partners aiming at acquiring geotechnical data using the WiMUST concept will be conducted later this year.

Acknowledgements

We gratefully acknowledge the contributions of our colleagues at ISR/IST to transition from the laboratory to the real world, as well as the fruitful and thought provoking discussions with the members of the WiMUST project team.

REFERENCES

Al-Khatib, H., Antonelli, G., Caffaz, A., Caiti, A., Casalino, G., Bielic de Jong, I. & Pascoal, A. (2015, May). The Widely Scalable Mobile Underwater Sonar Technology (WiMUST) project: an overview. *Proceedings of MTS/IEEE Oceans 2015*, Genova, 1-5.

Eustice, R. M., Singh, H., and Whitcob, L. (2011). Synchronous-clock, one-way-travel-time acoustic navigation for underwater vehicles. *Journal of Field Robotics*, 28(1), 121-136.

Ghabcheloo, R., Aguiar, A. P., Pascoal, A., Silvestre, C., Kaminer, I., & Hespanha, J. (2009). Coordinated path-following in the presence of communication losses and time delays. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 48(1), 234-265.

Indiveri, G., and Gomes, J. (2014). Geophysical surveying with marine networked mobile robotic systems: The WiMUST project. *Proceedings of the International Conference on Underwater Networks & Systems* (WUWNET'14), ACM, New York, NY, USA.

Websites:

WiMUST project: http://wimust.isme.unige.it/

Investigating the use of a video technique for wave run-up measurements on a breakwater in a laboratory flume

U. Andriolo (1), P. Poseiro (2), M.T. Reis (2), A. P. Bastos (1), C.J.E.M. Fortes (2), T. Garcia (2)

(1) Instituto Dom Luiz, Faculty of Sciences, University of Lisbon, Lisbon, Portugal. uandriolo@fc.ul.pt.

(2) LNEC, National Laboratory for Civil Engineering, Lisbon, Portugal.

Resume: Wave run-up parameters are key factors in studying coastal flooding. An experiment was performed at LNEC to study wave run-up and overtopping on a breakwater.
This work investigates the possibility of measuring wave run-up by using a video-monitoring technique. Water level oscillations were identified on the breakwater slope over time. Wave run-up was marked on each timestack image produced for each test.
Run-up events were identified and related to the surf similarity parameter. Properties of wave run-up derived from video imagery were analysed and compared to data from a wave gauge placed over the breakwater cross-section. Results confirmed that the video imagery technique is an alternative technique for measuring run-up in physical model experiments.

Key words: hydrodynamics, run-up, overtopping, physical model, image processing, timestack.

1. INTRODUCTION

Wave run-up characteristics on coastal structures are crucial for assessing the risk of overtopping. In-depth investigation of wave run-up is needed to predict the impact of overtopping and to understand its occurrence.

This study considers five of the tests conducted in a physical model at the LNEC experimental facilities as part of the HIDRALERTA project (Fortes *et al.*, 2013). The images acquired by a common camcorder were processed to analyse the interactions between waves and a breakwater. Wave run-up measurements and the number of overtopping events were obtained through the use of timestack images. Results are related to the wave characteristics and are validated through comparison with measurements obtained from wave gauges.

2. METHODS

2.1 Physical model

A physical model was built in a flume (49.4 m length, 1.60 m width and 1.20 m height) at the Maritime Hydraulics Testing Hall of LNEC. It reproduced the existing cross-section of the South Breakwater protecting Quay 12 of Praia da Vitoria Port (Fig. 1). The model was built and operated according to Froude's similarity law, with a geometrical scale of 1:48.

The model cross-section of the breakwater is shown in Fig. 2. It had an upper armour slope of 2:3, made of tetrapods of 200 g, and a lower rock slope of 1:4. The armour crest width was 16.7 cm and the armour freeboard was 22.1 cm for a water depth at the structure of 37.5 cm. The breakwater crest had a recurved wave return wall with a freeboard of 27.1 cm.



Fig. 1. Left: aerial view of Praia da Vitória Port, with the South Breakwater and Quay 12 in the foreground. Right: detail of South Breakwater crest.

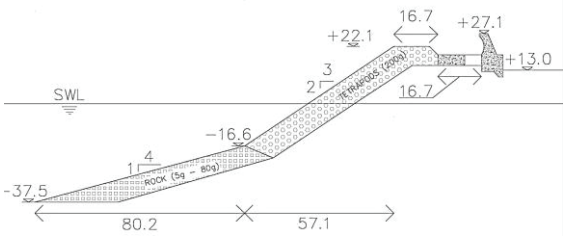


Fig. 2. Breakwater cross-section at model scale (Units: cm).

Three resistive-type wave gauges were installed close to the wave-maker to determine the wave characteristics from measurements of the water surface elevation. Three other wave gauges were also deployed in front of the structure to define the incident wave conditions. Their sampling frequency was 50 Hz. A wave gauge was positioned on the armour slope for measuring wave run-up (Fig. 3) with the same sampling frequency. The piston-type wave-maker was set to generate irregular waves.

2.2 Video data

A commercial camcorder was placed looking at the breakwater through the flume's side window. A sequence of video images was recorded during the 21-minutes-long wave runs at a frequency of 50 frames per second. The video footage was originally intended only for documentation and visual

reference; the optical system was not set-up for use in a video monitoring technique. Nevertheless, the data quality was suitable for the aim of this study.



Fig. 3. Left: physical model, side view through the window of the wave flume. Right: top view of the model and of the wave gauge placed over the breakwater armour.

Optical image data sequences were processed to extract wave run-up values on the breakwater armour (excluding the armour crest and the recurved wave return wall). The method required several steps: i) frames were taken at a frequency of 10 per second; ii) in each frame, the same cross-shore transect was defined on the seaward face of the model's breakwater armour (red line in Fig. 4); iii) the time-series of pixel colours were sampled along the transect from the image sequence in order to produce timestack images; iv) water surface oscillations were manually marked on the timestack images; v) discrete run-ups were computed by transforming the marked positions on the timestack images into elevations, through interpolation on the transect (Fig. 5).

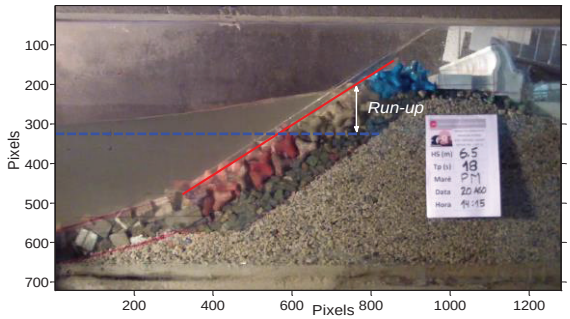


Fig. 4. Original snapshot with initial water level (dashed blue line) and model cross-section for timestack production (solid red line).

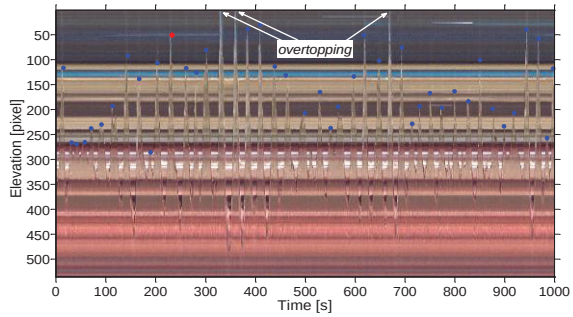


Fig. 5. Example of timestack image; blue points indicate run-up values. Red point highlights the run-up value for the snapshot in Fig. 4. White arrows show overtopping events of the armour.

2.3 Wave run-up and overtopping analysis

Run-up statistics were computed both from wave gauge records and from video-derived data, namely:

- $R_{up\ mean}$: average of all measured run-up values;
- $R_{up2\%}$: value exceeded by only 2% of all measured run-up values;
- $R_{up\ 1/10}$: mean of the highest one tenth of all measured run-up values;
- $R_{up\ sig}$: mean of the highest third of all measured run-up values.

Note that only run-ups below the armour crest were considered. Run-ups above the armour crest, which generated wave overtopping of the armour, were not taken into account. Consequently, the number of overtopping events at the armour crest was computed by identifying those wave run-ups that exceeded the armour crest (not the recurved wave return wall), that is those run-ups that exceeded the timestack profile (represented as the top limit of Fig. 5).

3. RESULTS

As mentioned before, five tests were considered for this study. Table 1 gives the hydrodynamic characteristics for each one of the five tests (all values in prototype scale) in terms of spectral incident significant wave height, H_{m0}, spectral mean wave period, $T_{m-1,0}$, surf similarity parameter, $\xi_{m-1,0}$ $(=tan\alpha/(H_{m0}/L_{om-1,0})^{0.5}$, with α the angle between the armour slope and the horizontal, $L_{om-1,0}=gT_{m-1,0}^2/2\pi$ and g the acceleration of gravity), number of wave run-ups (manually picked) and number of overtopping events.

Table 1. Wave run characterization in terms of number, H_{m0}, $T_{m-1,0}$, $\xi_{m-1,0}$, number of wave run-ups (manually picked) and number of overtopping events (all values in prototype scale).

n. of wave run	H_{m0} [m]	$T_{m-1,0}$ [s]	$\xi_{m-1,0}$	n. of run-ups	n. of overtopping events
35	6.5	16.4	5.34	547	25
39	8.0	12.9	3.82	670	87
41	7.5	13.0	3.97	648	73
53	6.8	9.4	2.99	875	80
91	9.0	12.9	3.59	673	177

The number of wave run-ups marked on timestack images clearly depends on the peak wave period and on the surf similarity parameter: it decreases with increasing values of $T_{m-1,0}$ and $\xi_{m-1,0}$.

Wave run-up analysis is shown in Fig. 6, where the dimensionless run-up, $R_{up2\%}/H_{m0}$, is plotted against the surf similarity parameter, $\xi_{m-1,0}$. Values of $R_{up2\%}/H_{m0}$ are comprised between 1 and 1.5 for values of $\xi_{m-1,0}$ from about 3 to 5.4. These results are in reasonable agreement with the data shown by Pullen *et al.* (2007) for two layers of rock on a 2:3 slope over a permeable core. Nevertheless, they are slightly lower than the run-up equation suggested by those authors, which may be due to the different values of the roughness/permeability coefficient applied for tetrapods, γ_f=0.38, and for two layers of rock on a permeable core, γ_f=0.40.

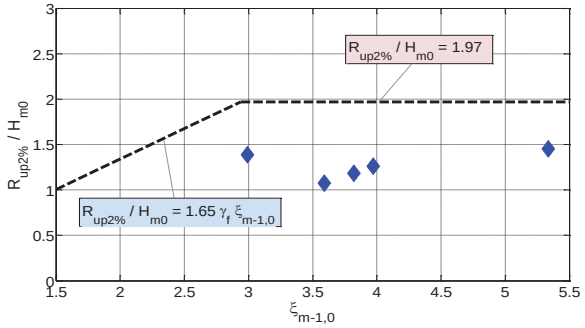


Fig. 6. Relationship between the surf similarity parameter and video-derived run-up measurements.

The correspondence between video-derived run-ups and wave gauge measurements is presented in Fig. 7.

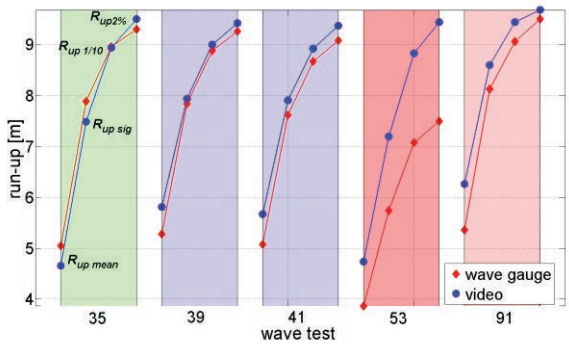


Fig. 7. Relationship between run-up statistics derived by wave gauge measurements (red diamonds) and by timestack images (blue dots) (all values in prototype scale).

Video-derived measurements are generally higher than the wave gauge values, despite the fact that there is a good agreement between the two methodologies (except for run 53). Note that the values of $R_{up2\%}$ and $R_{up\ 1/10}$ are quite similar for all runs, despite their different wave conditions, since the run-up values considered by the methodologies are only those below the armour crest and the ones above are considered as overtopping events.

Differences between the methodologies (mainly for run 53) may be due to their own limitations. On the one hand, turbulence generated by wave impacts on the structure and displacements of the armour units may lead to incorrect measurements of run-up by the wave gauge. On the other hand, the transect for timestack production (red line in Fig. 4) was defined on the breakwater slope, whereas the wave gauge was placed 2 cm above;

4. CONCLUSIONS

This work presents the research performed for measuring wave run-up on a breakwater using a video technique. Wave run-up statistics and number of overtopping events were related to the incident wave characteristics. Results confirmed the suitability of the video technique for deriving wave run-up characteristics.

In future work, the use of a diffusive light in the physical model is recommended, as well as a fixed camera installation. Such practices would allow automated run-up detection and would improve measurement accuracy.

Acknowledgments

Umberto Andriolo was supported by the EARTHSYSTEM Doctorate Programme led by Institute Dom Luiz Associate Laboratory at the University of Lisbon (SFRH/BD/52558/2014). Pedro Poseiro was supported by the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT) through the PhD grant SFRH/BD/97193/2013. The physical model tests were performed under the scope of the research project HIDRALERTA (PTDC/AAC-AMB/120702/2010) also funded by FCT.

REFERENCES

Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Poseiro, P., Capitão, R., Santos, J.A., Pinheiro, L.P., Rodrigues, A., Sabino, A., Rodrigues, M.C., Raposeiro, P.D., Ferreira, J.C., Silva, C., Simões, A., Azevedo, E.B. (2013) O Projeto HIDRALERTA – Sistema de Previsão e Alerta de Inundações em Zonas Costeiras e Portuárias. *Proc. of the 8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*.

Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schuttrumpf, H., Van der Meer, J. (2007). *EurOtop: Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment manual*, Kuste.

Travel distance of wave overtopping at a rubble mound breakwater with a recurved wall: comparison between physical modelling and empirical formulas

P. Poseiro (1), M.T. Reis(1), C.J.E.M. Fortes(1) and T. Garcia(1)

(1) LNEC, National Laboratory for Civil Engineering, Lisbon, Portugal; pposeiro@lnec.pt, treis@lnec.pt, jfortes@lnec.pt, tgarcia@lnec.pt.

Abstract: The evaluation of the travel distance of wave overtopping behind coastal structures is very important for estimating the damaging impacts. Usually, these calculations can be performed by applying empirical formulas but they are limited to the wave/water level conditions and structure characteristics for which they were developed.
This paper describes the application of existing formulas to a cross-section of the south breakwater of Praia da Vitória port (Terceira island, Azores, Portugal), which is protected by a recurved wave return wall. Results from physical model tests performed at LNEC are used to test, validate and calibrate those formulas. The formula that provided the best fit to the measured travel distances was developed by Besley (1999) but discrepancies were still considerable. Following a sensitivity analysis on the empirical parameters, new parameter values were suggested, as well as adjusted Besley (1999) and Lykke Andersen *et al.* (2009) formulas, which improved significantly the agreement with the new physical model data.

Keywords: wave overtopping, travel distance, physical modelling, empirical formulas, port structures, Praia da Vitória.

1. INTRODUCTION

The port and bay of Praia da Vitória are located on the east coast of the Terceira Island, in the Azores archipelago. It is one of the largest port structures in the Azores and second only to Ponta Delgada port (São Miguel island) in what refers to shipping traffic. The south breakwater of Praia da Vitória was built in the 1980s and is rooted at the south end of the bay (Fig. 1).

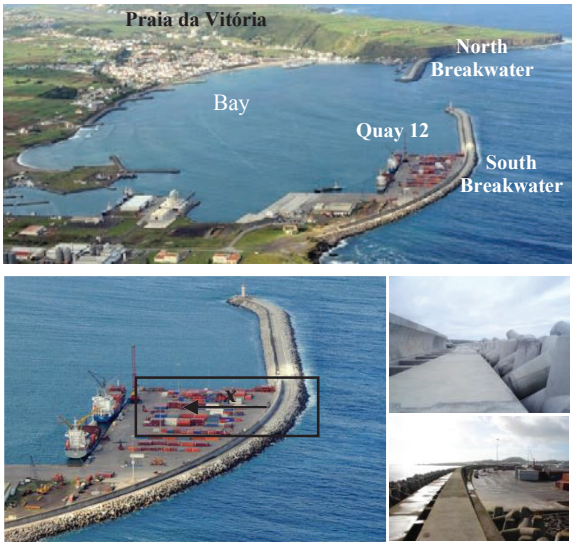


Fig. 1. Aerial view of Praia da Vitória port and quay 12 protected by the south breakwater.

The main function of this structure is to protect the commercial (mainly quay 12) and fishing facilities. The breakwater cross-section that protects quay 12 has a recurved wave return wall to increase the protection from wave overtopping provided to this area.

Wave overtopping occurs frequently, especially in winter. Recently, on 15th January 2016, Alex hurricane reached the Azores archipelago and several events of wave overtopping occurred at the south breakwater (Fig. 2).

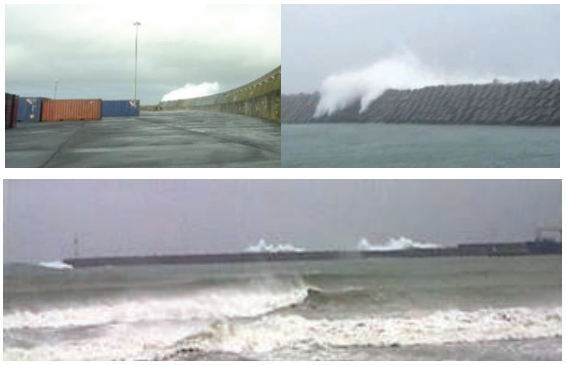


Fig. 2. Alex hurricane in January 15, 2016.

Usually, in the most severe cases, wave overtopping reaches up to 1/5 of the total width of quay 12 and one of the main possible consequences is the damage of containers and equipment stored at the quay. In those situations, the harbour authority relocates the containers/equipment as far as possible from the breakwater. The question is how far back is safe.

Consequently, the evaluation of the travel distance of overtopping waves is very important for the estimation of damage (Lykke Andersen *et al.*, 2009). There are different empirical formulas to evaluate this distance (Jensen, 1984; Besley, 1999; Bruce *et al.*, 2005; Van Kester, 2009; Lykke Andersen *et al.*, 2009) depending

on the type of overtopped structure. However, none of the considered structures were developed specifically for the south breakwater of Praia da Vitória port, and so the existing formulas can only give an approximate estimation of the travel distance for the present case.

Therefore, the main objective of this study is to validate and calibrate existing formulas for Praia da Vitória breakwater using physical model data and to determine which one gives the best results. In this connection, overtopping tests were conducted on a two-dimensional physical model implemented at LNEC as part of the HIDRALERTA research project (Fortes *et al.*, 2013). Several trays behind the wave return wall were used to measure overtopping volumes obtained during each test. The main physical model data are compared with results from the existing formulas.

2. METHODS

2.1 Physical model

The physical model was built in a wave flume (49.4 m long, 1.60 m wide and 1.20 m high) at the Maritime Hydraulics Testing Hall of LNEC. It reproduced the existing cross-section of the south breakwater protecting quay 12 of Praia da Vitória port (Fig. 3).

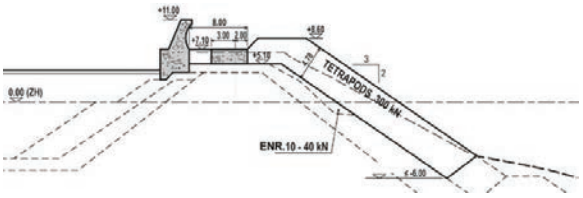


Fig. 3. Tested cross-section of the south breakwater (all values in meters, at prototype scale).

The cross-section has an upper armour slope of 2:3, made of two layers of 300 kN tetrapods, and a lower slope of 1:4, with two layers of 5 to 90 kN rock. The structure crest is composed of three distinct parts: a 8 m wide armour crest, with a freeboard of 8.60 m above chart datum (ZH); a 8 m wide concrete slab (3 m permeable and 5 m impermeable), with a freeboard of 7.10 m (ZH); and a recurved wave return wall, with a freeboard of 11 m (ZH).

The model was built and operated according to Froude's similarity law, with a geometrical scale of 1:48. Three resistive-type wave gauges (B1, B2 and S1) were installed close to the piston-type irregular wave-maker to determine the wave characteristics from measurements of the free surface elevation (Fig. 4). Seven other resistive-type wave gauges (L1 to L7) were also deployed to establish the wave characteristics along the flume. A wave gauge was positioned on the armour slope (S2) for measuring wave run-up and a wave gauge (L8) was located at the top of the recurved wall to identify overtopping events. Every gauge recorded at a sampling frequency of 50 Hz, except for gauges B1 and B2, which recorded at a sampling frequency of 40 Hz.

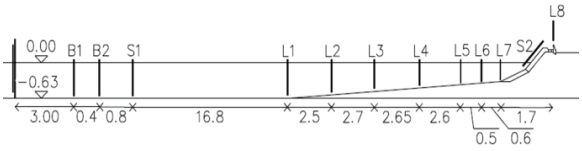


Fig 4. Sketch of wave flume, model profile and location of wave gauges (all values in metres, at model scale).

To measure the total wave overtopping volume at distance *x* behind the structure, a group of 6 trays was placed behind the wall (Fig. 5). At the end of each test, the mean overtopping discharge, Q_x, was evaluated for each tray.

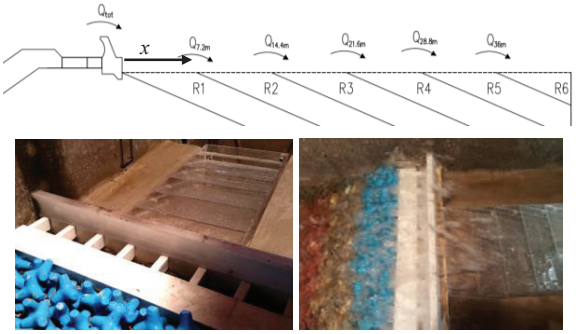


Fig. 5. Sketch of the equipment (with 6 overtopping trays) used for measuring travel distance of mean overtopping discharges. View of the equipment and of an overtopping event during a physical model test.

Irregular waves were generated according to a JONSWAP empirical spectrum, with a peak enhancement factor γ=3.3. Nominal wave conditions at the toe of the structure are presented in Table 1. Each test was run during a time period equivalent to 1000 waves (approximately 3-4 hours in the prototype) and the spectral significant wave height, H_{mo}, and spectral peak period, T_p, corresponded to the measured values in front of the structure, based upon L5, L6 and L7 wave gauges. Some tests were repeated several times (Table 1) in order to infer on the accuracy of the obtained results. In these tests one water level was considered, which corresponded to Mean High Water Springs (MHWS) with an increment to account for storm surge.

Table 1. Selected wave conditions for model tests and number of test repetitions.

T_p (s) / H_{mo} (m)	10	12	14	18
6.5	-	-	-	5
7.5	-	-	5	-
8.0	3	5	5	-
8.5	-	5	5	-
9.0	-	-	5	-

2.2 Empirical Formulas

Several empirical formulas have been developed in order to estimate the mean overtopping reduction rate, Q_x/Q_{total}, as a function of the travel distance, x, from the structure (Table 2).

Table 2. Empirical formulas to estimate mean wave overtopping reduction rate with distance, x, from the overtopped structure.

Reference	Reduction factor
Jensen (1984)	$\frac{Q_x}{Q_{total}} = 10^{-\frac{x}{\alpha}}$
Besley (1999)	$\frac{Q_x}{Q_{total}} = \min\left[3.06\exp\left(-1.5\frac{x}{H_s}\right), 1\right]$
Bruce *et al.* (2005)	$\frac{Q_x}{Q_{total}} = \exp\left(-k\frac{x}{L_0}\right)$
Van Kester (2009)	$\frac{Q_x}{Q_{total}} = 1.109\exp\left[-3.2\cdot 10^8\left(\frac{x}{H_s}\cdot\frac{1}{(H^*T^*)^6}\right)\right]$ $H^*T^* = \frac{H_s}{R_c}\cdot T_s\cdot\sqrt{\frac{g}{R_c}}$
Lykke Andersen *et al.* (2009)	$\frac{Q_x}{Q_{total}} = \exp\left[-1.1\cdot s_{op}^{-0.05}\cdot\frac{\max\left(\frac{x}{\cos\beta} - 2.7\cdot y\cdot s_{op}^{0.15}, 0\right)}{H_{m0}}\right]$

Note: α is a constant; H_s is the average of the highest 1/3 of the waves in a record; k is a constant; L_0 is the deep water wavelength based on $T_{m-1,0}$ (spectral mean wave period); g is the gravitational acceleration; R_c is the crest freeboard of the structure; T_s is the average period associated with the highest 1/3 of the waves in a record; s_{op} is the wave steepness determined with L_0 based on T_p; β is the direction of wave attack w.r.t. the normal of the structure; y is the height of the wall measured from its top.

These formulas were developed based on physical model tests performed for specific structures. Jensen (1984) developed a formula for a breakwater with a tetrapod armour layer and with/without a crown wall. He concluded that the intensity of overtopping decreases exponentially with the distance from the breakwater. Besley (1999) developed two different formulas, for accropodes and for rock armoured structures (Table 2 only presents the formula for rock). Bruce *et al.* (2005) carried out their experimental tests for seawalls only. Van Kester (2009) developed his formula for rock armour layers. Lykke Andersen *et al.* (2009) considered different structure configurations for cube armour layers, including a case with a recurved wave return wall.

3. RESULTS

3.1 Physical model analysis

Table 3 presents the average results obtained from the test repetitions for each incident wave condition (at the toe of the structure) and the average results for the mean overtopping discharge.

Table 3. Average values of the incident wave conditions and the mean overtopping discharge.

Incident wave conditions				Q_x (l/s/m)				
Test	H_{mo} (m)	T_p (s)	Rep.	R1 (0 cm)	R2 (15 cm)	R3 (30 cm)	R4 (45 cm)	R5 (60 cm)
1	8.04	10.1	3	0.6819	0.3813	0.1439	0.0467	0.0143
2	7.91	12.2	5	1.3746	0.8430	0.2812	0.0991	0.0323
3	8.55	12.0	5	2.5826	1.4924	0.4570	0.1367	0.0431
4	7.30	14.4	5	0.2402	0.1295	0.0270	0.0050	0.0009
5	7.72	14.6	5	1.5553	1.0400	0.4548	0.1615	0.0422
6	8.31	14.4	5	3.0757	2.1760	1.0114	0.3377	0.1136
7	9.03	14.3	5	3.8637	2.6408	0.9673	0.2953	0.0878
8	6.43	17.4	5	0.5668	0.3436	0.1682	0.0161	0.0023
		Total	38					

The presented results show the mean overtopping reduction as a function of the distance behind the structure. Notice that Table 3 does not present the mean overtopping discharge in each tray but the mean overtopping discharge that surpasses the previous tray. For example: the 1st tray, R1, shows the total overtopping discharge directly behind the structure (0.6819 l/s/m for test 1) and the 2nd tray, R2, shows the total mean overtopping discharge minus the mean overtopping discharge in the 1st tray (0.3813 l/s/m for test 1). Furthermore, the results for the 6th tray are not presented since falling water jumped out of this tray.

In order to evaluate the variability in the mean overtopping discharge in each test based on the performed repetitions, the coefficient of variation of the results was calculated for each test condition. As shown in Fig. 6, the variability in the results is greater for tests 4 and 8 than for the others and it increases with distance x from the wall. This higher variation is related to the lowest overtopping quantity observed in the tests.

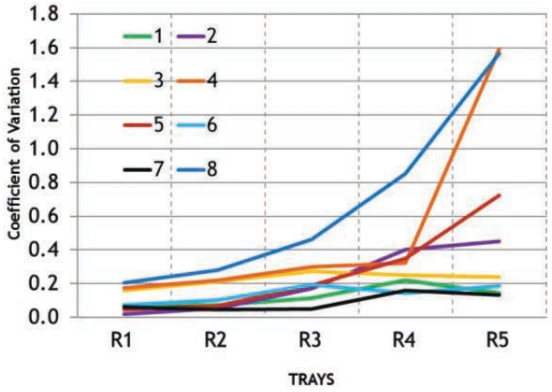


Fig. 6. Coefficient of variation of Q_x for tests 1 to 8.

As an example, Figure 7 shows the average, minimum and maximum values of mean overtopping discharge obtained in each tray for Test 8.

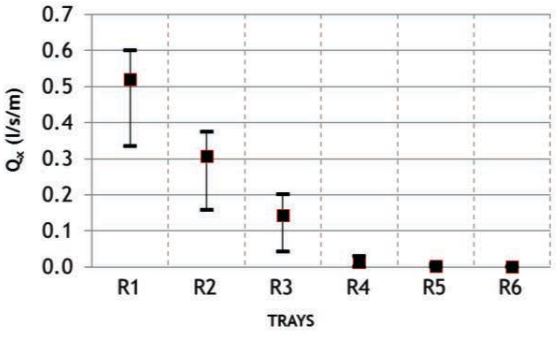


Fig. 7. Average, minimum and maximum mean overtopping discharges for test 8.

3.2 Comparisons

A comparison was performed between the physical model data and the results from the formulas. Assuming the physical modal data as the reference values, several measures of statistical errors were calculated, given by the following expressions (Eqs. 1, 2 and 3):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

$$BIAS = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i) \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right| \times 100 \quad (3)$$

where y_i is the vector of n observations and $\hat{y}_i$ is the vector of n predictions.

First, the results from the formulas were obtained considering the equations and parameters recommended by the authors. Table 4 presents this comparison by showing the values of the RMSE, the BIAS and the MAPE.

Table. 4. RMSE, BIAS and MAPE for Q_x determined from existing formulas.

	RMSE ***(l/s/m)***	***BIAS*** ***(l/s/m)***	***MAPE*** ***(%)***
Jensen (1984) ($\alpha = 20$)	0.1784	0.4257	51.6
Besley (1999) (Rock armoured formula)	0.1682	0.3595	54.6
Bruce *et al.* (2005) ($k = 30$)	0.2726	1.1878	60.5
Lykke Andersen *et al.* (2009)	0.3797	1.4304	63.0

Note that the results for Van Kester (2009) formula have not been included in Table 4 since they did not show any agreement with the new physical model data.

Then, in order to reduce the discrepancies in Q_x obtained between the physical model data and the results from the existing formulas (Table 4), a sensitivity analysis on some empirical parameters was carried out to get a better fit to the experimental data (Table 5).

Table. 5. RMSE, BIAS and MAPE for Q_x determined from modified formulas.

	RMSE ***(l/s/m)***	***BIAS*** ***(l/s/m)***	***MAPE*** ***(%)***
Jensen (1984) ($\alpha = 25$)	0.1371	0.1928	53.4
Besley (1999) with modifications	0.0740	0.2516	53.0
Bruce *et al.* (2005) ($k = 38$)	0.1801	0.6163	60.3
Lykke Andersen *et al.* (2009) with modifications	0.0796	0.2660	46.1

The modifications included changes in the values of the empirical parameters for Jensen (1984) and Bruce *et al.* (2005) formulas, while Besley (1999) and Lykke Andersen *et al.* (2009) formulas were rewritten as shown below (Eqs. 4 and 5):

$$\frac{Q_x}{Q_{total}} = \min\left[2\exp\left(-1.35\frac{x}{H_s}\right), 1\right] \quad (4)$$

$$\frac{Q_x}{Q_{total}} = \exp\left[-1.1 \cdot s_{0p}^{-0.05} \cdot \frac{\max\left(\frac{x}{\cos\beta} - 1.2 \cdot \gamma \cdot s_{0p}^{0.15}, 0\right)}{H_{m0}}\right] \quad (5)$$

4. CONCLUSIONS

This work presented the physical model tests carried out for measuring mean wave overtopping reduction with distance behind a recurved wave return wall of a rubble mound breakwater with a tetrapod and rock armour layer.

In spite of being common to observe variations on overtopping measurements for the same test conditions, the variation was not so large in this study. When comparing the new physical model data with results from existing formulas, significant discrepancies were identified, mainly due to the fact that the tested structure presents features that were not considered simultaneously in previous tests. However, the errors (mainly the RMSE and the BIAS) decreased drastically when Besley (1999) and Lykke Andersen *et al.* (2009) formulas were rewritten using different parameter values.

The authors believe that, in future works, the errors can be minimized by performing more experiments and by developing a new empirical formula for this kind of structure.

Acknowledgments

The authors acknowledge the financial support of the European project H2020-INFRA-2014-2015, N.654110 - Hydralab+ Adaptation for Climate Change and of the research project HIDRALERTA (PTDC/AAC-AMB/120702/2010), funded by the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT). Pedro Poseiro PhD studies are also supported by FCT, research grant SFRH/BD/97193/2013.

REFERENCES

Besley, P. (1999). *Overtopping of Seawalls.* Environment Agency, Bristol. 132 pp.

Bruce, T., Pullen, T., Allsop, W., Pearson, J. (2005). How far back from a seawall is safe? Spatial Distributions of wave overtopping. *International Conference on Coastlines, Structures and Breakwaters, ICE*, Thomas Telford, pp. 166–175.

Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Poseiro, P., Capitão, R., Santos J.A., Pinheiro, L.P., Rodrigues, A., Sabino, A., Rodrigues, M.C., Raposeiro, P.D., Ferreira, J.C., Silva, C., Simões, A., Azevedo, E.B. (2013). O Projeto HIDRALERTA – Sistema de Previsão e Alerta de Inundações em Zonas Costeiras e Portuárias. *8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Lisboa, 10 e 11 de outubro, 2013.

Jensen, J. (1984). *A Monograph on Rubble Mound Breakwaters.* Danish Hydraulic Institute, 210 pp.

Lykke Andersen, T., Burcharth, H.F., Gironella, F.X. (2009). Single Wave Overtopping Volumes and Their Travel Distance for Rubble Mound Breakwaters. *Coastal Structures 2007 - 5th Coastal Structures International Conference, CST07*, 2-4 July 2007, Venice, Italy, pp. 1241–1252.

Van Kester, D. (2009). *Spatial distribution of wave overtopping.* Delft University of Technology, Master Thesis.

Índice de autores

A
Abreu, P. 470; 474
Abreu, T. 137
Agostinho, P 427
Aires, E. 67
Almeida, A. 45
Almeida, N. 87; 175; 389
Almeida, R. 49
Almeida, S. 87; 175; 183; 389
Alonso-Martirena, A. 427
Alves, M. 87; 389
Amorim, A. 199
Andriolo, U. 377; 435; 478
Antunes, C. 163; 211; 401
Aouf, L. 125
Araújo, M.F. 271
Arcos Santos, M. 373
Arenga, M. 56
Avilez-Valente, P. 159
Azevedo, A. 435
Azevedo, E. 183

B
Baptista, P. 137; 203; 225
Barroso, C. 141
Bartilotti, C. 467
Bartolomeu, S. 67
Basso, J. 75
Bastos, A.P. 478
Bastos, L. 373; 405
Behrens, A. 167
Beirão, A.S. 215
Bernardes, C. 137
Bertin, X. 143
Bio, A. 373
Bonanata, R. 253
Borges, C. 295; 307
Bosnic, I. 249
Boto das Neves, B. 451
Bouzas, A. 137; 225
Branquinho, A. 369
Braunschweig, F. 109; 117
Braunschweig, S. 109
Bravo, H. 79
Brito, D. 109; 117
Bué, I. 125

C
Cabral, M. 324
Calado, A. 470
Caldas, B. 253
Camacho, G. 393
Campos, A. 393
Campuzano, F.J. 105; 109; 117
Cândido, J. 439
Cardoso, J. 397
Cardoso, R.M. 155; 171
Carinhas, D. 295
Carreiro-Silva, M. 320
Carvalho, P. 33
Cascalho, J. 249; 335
Catalão, J. 125
Catarino, N. 389
Catita, C. 211; 401
Churro, C. 467
Coelho, C. 225
Conceição, V. 75; 79
Conde, J.M.P 101; 463
Correia, C. 283
Correia, C. 183
Costa, P. 415
Costa, P. 25
Costa, R.T. 121
Cotrim, S. 467
Coutinho, J. 25
Couto, R. 317; 320
Cravo, A. 207; 283; 287; 291
Cruz, J. 21

D
David, G. 393; 405
Deus, R. 87; 175; 389
Dias, T. 21; 33; 37
Didier, E. 419
Dobrynin, M. 167
Drago, T. 249
Duarte, F. 363
Duarte, J. 313; 324; 335; 447

E
Esteves, R. 97; 183

F
Farias, I. 393
Fernandes, C. 427
Fernandes, R. 105; 109; 117
Fernández, X. 431
Ferreira, C. 137; 225
Ferreira, F. 29; 351; 415; 447; 459
Ferreira, J. 143
Ferreira, R. 97
Ferreira, T. 320
Fortes, C.J.E.M. .91; 101; 151; 409; 463; 478; 481
Fortes, I. 49
Fortunato, A. 121; 143; 179; 187; 191; 261
Fradique, C. 415; 459
Fraga, T. 443
Freire, F. 405
Freire, J. 443
Freire, P. 121; 143; 179; 261
Freitas, M.C. 229; 271

G
Gabriel, S. 463
Galvão, P. 67
Gama, A. 279; 299
Garcia, T. 478; 481
Gaspar, J. 56
Geraldes, D. 317; 320
Giannoukakou-Leontsini, I. 203
Gomes, F. 369
Gomes, J.L. 121
Gonçalves, J.A. 373
González, P. 431
Granja, H. 373
Grosso, N. 389
Guerra, M.T. 393
Guerreiro, M. 129
Guerreiro, R. 41; 52

H
Henriques, V. 393
Hermínio, J. 249

I
Iglesias, I. 159; 405
Inácio, B. 369
Infante, P. 295

J
Jacob, J. 207; 283; 287; 291
Jorge da Silva, A. 87; 129; 175; 219; 405; 451; 455
José, A. 49
Juliano, M. 105
Julião, H. 49

L
Lamas, L. 87; 175; 183; 389
Lapa, N. 313; 339; 447
Lázaro, C. 405
Leandro, S.M. 467
Leitão, J. C. 67
Leitão, P. C. 67; 147
Lemos, G. 167
Lemos, M. 253
Lemos, R. 409
Liberato, M.L.R. 143
Lima, D.C.A. 155; 171
Lira, C. 435
Lopes, A. 369
Lopes, P. 91; 409
Lopes da Costa , C. 133
Loureiro, B. 455
Lourenço, A. 141
Luís, J. 63
Luna, T. 203

M
Machado, I. 439
Madureira, P. 470
Magalhães, C. 467
Magalhães, E. 369
Malhadas, M.S. 67
Manteigas, L. 49
Manuel, A. 397
Marques, C. 33
Marques, F. 339
Marques, R. 467
Marracini, A. 393
Marreiros, M. 195
Martins, I. 195
Matos , J. S. G. 151
Melo, R. 385
Mendes, A. 121
Mendes, D. 113; 187; 191; 451; 455
Mendonça, A. 307
Miranda, M. 29; 415; 459
Miranda, P. 167; 171
Moita, T. 199
Monteiro, C. 37; 52; 327; 343; 459
Monteiro, I.T. 141
Moreira, N. 141
Moreira, S. 233; 237; 271; 313
Moreira da Costa, N. 451
Moreno, L. 317; 320
Mota, P. 87
Moura, A. 41; 52; 397

N
Neves, C.F. 101
Neves, D. R.C.B. 151
Neves, M.G. 97; 215; 419
Neves, R. 105
Nobre, A. 381
Nobre Silva, A.M. 435
Nunes, A. 423

O
Oliveira, A. 121
Oliveira, A. 229; 233; 237; 313; 324; 335
Oliveira, F. S. B. F. 241; 245; 257
Oliveira, J. N. C. 241; 245
Oliveira, M. 455
Oliveira, M.A. 405
Oliveira, P.B. 175; 199; 389
Oliveira, T. 97
Ovelheiro, A. 291

P
Pablo, R. 121
Pacheco, J. 317; 320
Palma, C. 275; 279; 299; 303; 307

Parra, H. 320
Pascoal, A. 470; 474
Patriarca, I. 397
Peixoto, R. 159
Pinheiro, L. 91
Pinho, J. 159; 373
Pinto, J.P ...87; 113; 175; 183; 187; 191; 229; 455
Pinto, P 121
Pires Silva, A.A. 147; 151; 187; 191
Pombo, J. 313; 324; 359
Portela, L.I. 363
Poseiro, P. 91; 478; 481

Q
Quaresma, L. 129
Quartau, R. 327; 343

R
Ramos, A. 463
Range, P. 317; 320
Reis, J. 335
Reis, R. 463
Reis, T. 91
Reis, F. 183
Reis, L. 331
Reis, M.T. 409; 478; 481
Ribeiro, J. 67
Ribeiro, J. 470; 474
Ribeiro, M. 470; 474
Ribeiro, M. 265; 335
Rijo, N. 171
Rilo, A. 261
Rocha, A. 203
Rocha, A. 393; 405; 455
Rocha, A.C. 275; 303
Rocha, C. 211
Rodrigues, A. .. 327; 331; 335; 339; 343; 347; 351; 355; 359; 385; 459
Rodrigues, J. 67
Rodrigues, M. 143; 179; 261
Rogeiro, J. 121
Rosa, A. 287
Rosa, M. 249
Russo, J. 443

S
Sá, L. 121
Salgado, A. 443
Sanches, P. 397
Sánchez-García, E. 377
Sancho, F. 215
Santos, A. 393; 467
Santos, A.I. 313; 229; 233; 237
Santos, H. 67
Santos, J. 91
Santos, L. 21
Santos, M. 199
Santos, P. 275; 303
Santos, P.P. 261
Santos, R. 313; 327; 343; 347; 385; 447; 459
Santos, T. 299
Sebastião, L. 470; 474
Semedo, A. 125; 155; 167; 171
Silva, A. 467
Silva, A. 67; 147
Silva, A.P. 359
Silva, C. 317; 320
Silva, E. 467
Silva, H. 470; 474
Silva, J. C. 147
Silva, M. 439
Silva, P.A. 137; 203; 225
Silva, S. 447
Siva, J. 409
Soares, P.M.A. 155; 171
Sousa, C. 45
Sousa, M. 401
Stander, J. 141
Staneva, J. 167

T
Taboada, B. V. 405
Taborda, R. 249; 265; 335; 377; 435
Tavares, A.O. 261
Teixeira, P.R.F 419
Teles, J. E.S. 71
Trancoso, A.R. 109; 117
Trigo Teixeira, A. 241; 245
Tubarão, L. 203

V
Van Golde, I. 129; 405
Vasquez, F. 369
Valença, M. 279
Veiga, L. 253
Venâncio, S. 159
Ventura Soares, C. 83
Vicente, J. 21; 25; 29; 33; 37; 56
Vicente, R. 183
Vieira, J. 159
Vilar, P.M. 405
Vinhas, A. 331; 355; 447
Vitorino, J. 195
Viveiros, F. 317; 320

W
Whelan, C. 427

Nota: Alguns autores não utilizaram o Novo Acordo Ortográfico na elaboração dos artigos.



hidrográfico
marinha · portugal

Instituto Hidrográfico
Rua das Trinas, 49
1249-093 Lisboa – Portugal
Tel.: +351 210 943 000
Fax: +351 210 943 299
mail@hidrografico.pt
www.hidrografico.pt

KONGSBERG
FUGRO
qualitas instruments
CoReSyF
esri Portugal
TELEDYNE CARIS Everywhereyoulook™
Fundação Vodafone Portugal
MRA INSTRUMENTAÇÃO

Imagem: Modelo batimétrico de área na barra norte do porto de Lisboa, junto ao forte de S. Julião da Barra