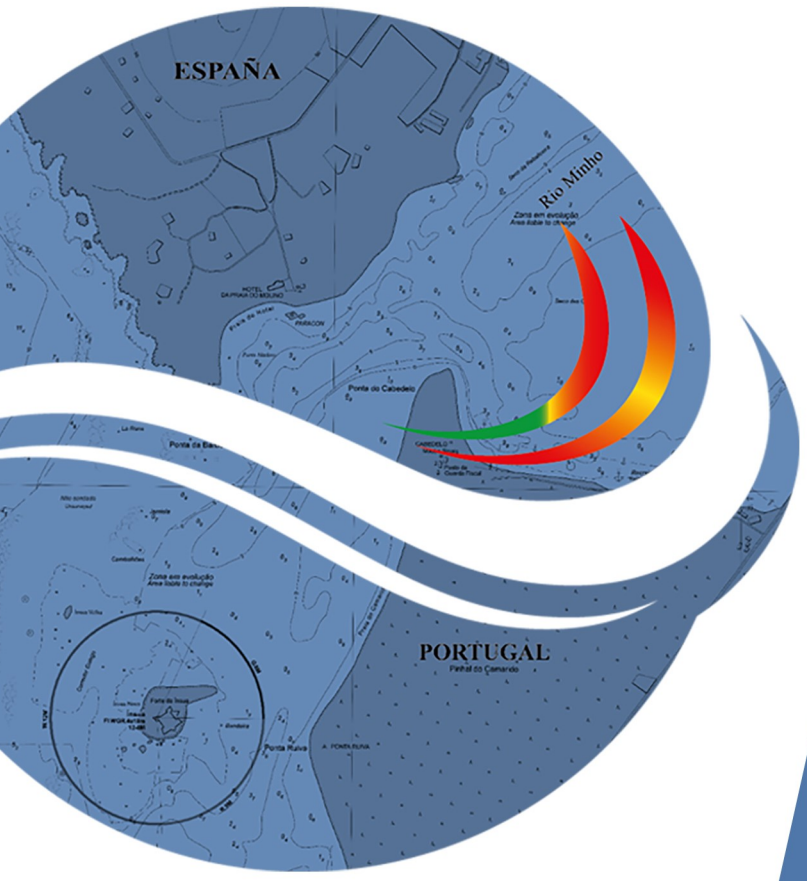


7as Jornadas de **Engenharia Hidrográfica**

2as Jornadas **Luso-Espanholas de Hidrografia**

21, 22 e 23 junho 2022

ATAS

ATAS

21, 22 e 23
junho
2022

7as Jornadas de Engenharia Hidrográfica

2as Jornadas Luso-Espanholas de Hidrografia

Lisboa

Título – Atas das 7.as Jornadas de Engenharia Hidrográfica / 2. as Jornadas Luso-Espanholas de Hidrografia
Autor – Instituto Hidrográfico
Tiragem – 60 exemplares
Edição e paginação – Instituto Hidrográfico, 2022
Impressão e acabamento –
ISBN – 978-989-705-164-7
Depósito Legal – **501640/22**

Índice Geral

I. Comissões 9

Honra, Organizadora e Científica

II. Patrocinadores e Apoios 11

III. Nota Introdutória 15

IV. Resumos Alargados 17

HIDROGRAFIA

La necesidad de renovar la Flotilla Hidrográfica del Instituto Hidrográfico de la Marina 21
G. Gómez-Pimpollo Crespo

Using airborne lidar bathymetry to map the coastal zone 25
C. de Jongh, B. Larsen

Collateral benefits' from the development of the Spanish Vertical Reference Surface for hydrography: deepening into the knowledge on sea-level changes 29
C. J. González, J. R. Torres, J. M. Quijano

Batimetria derivada de satélite: uma nova ferramenta para produção de cartografia náutica 33
C. Sousa, A. Matos

Resposta acústica de artes de pesca para captura de lula e ocultação à sondagem por golfinhos 37
M. Barreto, M. Gatta, V. Lobo

Levantamentos hidrográficos – classificação e recomendações 41
C. Monteiro, J. Vicente, L. Veiga, C. Marques, J. Cruz

A importância da formação em Hidrografia para o conhecimento e gestão dos espaços marítimos sob soberania ou jurisdição portuguesa 45
J. Gouveia, Z. Cardoso, T. Candeias

A Hidrografia num futuro não tripulado 49
C. Marques, J. Vicente

The SIMShore Project and coastal shallow water – Current status 53
C. Marques, P. Pinto, P. Brasil, F. Marques, A. Silva, R. Silva, N. Catarino, A. Sivertsen

4S Project, deriving bathymetry from satellite & UAVs images case studies 57
C. Marques, P. Pinto, C. Monteiro, A. Moura, C. Borges, K. Hartmann

CARTOGRAFIA

A nova configuração da Rede Geodésica Nacional 63
H. Ribeiro, A. Bernardes, A. Medeiro, P. Patrício, M. Caetano

Implementação do S-101 na Produção Cartográfica – Desafio e Impactos 67
A. Moura, P. Sanches, J. Vicente, A. Reis, A. Silva

Identificação de áreas de risco para a segurança da navegação no porto de Lisboa, para priorização e planeamento de levantamentos hidrográficos 71
T. Dias, A. Nunes, L. Veiga

S-100 – Situação atual. Desafios futuros 75
P. Sanches, J. Vicente, P. Nunes

SEGURANÇA DA NAVEGAÇÃO

Ripples – Web infrastructure for Supervision and Awareness 81
R. A. Santos, P. S. Dias, M. Ribeiro, M. Oliveira, J. Costa, M. Costa, P. Gonçalves, L. Venâncio, J. Galante, J. Pereira, J. Neiva, R. Mendes, A. S. Ferreira, G. Ramalho, J. Borges de Sousa

PNT Resilience and the impact of satellite radio positioning disruptions on pilotage teams 85
D. Castro, V. Conceição, S. Cavaleiro

89 Simulação com o SAFEPORT do impacto da tempestade Célia nos navios amarrados no porto de Sines
A. H. Gomes, L. V. Pinheiro, C. J. E. Fortes, J. A. Santos

OCEANOGRAFIA

95 Modelação da análise e previsão de marés e correntes de maré – ferramenta SeaTideWave67
I. Raimundo, C. Costa

99 Satellite-derived sea surface salinity for the Portuguese coast – evaluation of SMOS BEC L4 product
B. Biguino, E. Olmedo, A. Ferreira, N. Zacarias, L. Lamas, L. Favareto, C. Palma, C. Borges, A. Teles-Machado, J. Dias, P. Castellanos, A. C. Brito

101 On the variability of internal waves on the western Portuguese shelf
J. M. Magalhaes, J. C. B. da Silva, R. Nolasco, J. Dubert, P. B. Oliveira

105 Evidence of upwelling separation from the coast off NW Portugal
P. Nunes, R. Nolasco, J. Dubert, V. Brotas, P. B. Oliveira

109 Calibração de sensores hidro-oceanográficos da turbidez: gama de linearidade e homocedasticidade
A. Mendonça, D. Carinhas, V. Rodrigues, J. F. R. Leite

113 Processamento de dados maregráficos – estação de Viana do Castelo
D. Carinhas, M. Alves, P. Infante, A. Martinho, F. Vasquez

117 Agitação marítima em Portugal: 40 anos de dados
R. Esteves, J. P. Pinto, E. Craveiro

121 Melhoria do desempenho de modelos hidrodinâmicos estuarinos para previsão de níveis da água utilizando técnicas de ensembles
I. Iglesias, J. L. Pinho, W. Melo, P. Avilez-Valente, A. Bio, M. Cruz, J. Vieira, L. Bastos, F. Veloso-Gomes

125 La red de mareógrafos del Instituto Geográfico Nacional. Inicios, estado y evolución.
V. Martín Guijarro, V. Puente García

129 UniTIDE – uma ferramenta para dados maregráficos
D. C. P. Silva, D. Carinhas

133 Desenvolvimento de algoritmo para previsão 2D e 3D de propagação submarina de raios acústicos com reflexões – ferramentas REOART 2D e REOART 3D
J. Gonçalves, M. Gatta, C. Costa

137 Assessing wave-induced flooding risks at the Algarve coast for current and future conditions
J. L. Garzon, A. C. Zózimo, Ó. Ferreira, A. M. Ferreira, C. J. E. M. Fortes, M. T. Reis

141 ADCP backscattering patterns in a mid-shelf water column (Figueira da Foz – W Portugal): interaction between physical/biological forcing and particle dynamics
A. I. Santos, J. Magalhães, A. Oliveira, P. B. Oliveira, R. Nolasco, N. Zacarias, A. Amorim

145 On the importance of sustained glider observations to study the ocean dynamics
L. Lamas, I. Martins, J. Vitorino, C. Barrera

149 Towards a validation service of Sentinel-3 data using in-situ data collected by the MONIZEE system
L. Lamas, I. Martins, R. Esteves, P. Nunes

153 Environmental drivers of phytoplankton in the coast of Portugal
J. P. C. Cruz, A. Tracana, L. Favareto, A. Ferreira, C. Palma, C. Borges, J. Heumüller, A. C. Brito

157 Teoria de valores extremos aplicada à caracterização da sobrelevação meteorológica no porto de Leixões
P. Rodrigues, D. Carinhas, C. Lemos

161 Caracterização da tendência de subida do nível médio em Portugal
M. Picoto, D. Carinhas, C. Lemos

165 Caracterização da propagação da maré na costa ocidental portuguesa
F. Silva, D. Carinhas, C. Lemos

Monitorização da agitação marítima nas praias de Matosinhos e Internacional **169**
V. Lima, R. Esteves, N. Zacarias, F. Diniz, H. Lopes

Fluid-structure interaction of a leading depression N-wave shaped tsunami **173**
V. Lima, P. Avilez-Valente, M. A. Baptista, M. Miranda

Influência da orografia, orientação de linha de costa e temperatura de superfície do mar na estrutura do vento junto à costa **177**
J. Alves, R. Caldeira, P. Miranda

Caracterização oceanográfica na região noroeste costeira de Portugal Continental associada a diferentes regimes de forçamento **181**
C. Cunha, N. Zacarias, L. Lamas

Avaliação da qualidade dos produtos de temperatura de superfície do mar ESA SST CCI para a região costeira de Portugal, utilizando 30 anos de dados in situ **185**
A. Nunes, L. Lamas, S. Plecha, I. Martins

MSFD monitoring of water quality off Spain and Portugal using in situ and satellite retrievals **189**
V. Brotas, M. M. Angélico, S. Groom, A. Tracana, P. Nunes, S. Pardo, P. B. Oliveira

Boias oceânicas em tempo real – venturas, desventuras e aventuras **193**
I. Martins, F. Diniz, N. Zacarias

Caraterização da agitação marítima e das sobrelevações em torno das obras de expansão e requalificação do Porto Inglês (Ilha do Maio – Cabo Verde) **195**
R. E. Soares, C. J. E. M. Fortes, M. G. Neves, R. Lemos, C. Costa, L. G. Silva, L. Pinheiro

GEOLOGIA MARINHA

Origins and controlling factors of bedforms formed by supercritical sediment density flows on the southern shelf of Madeira Island **201**
V. Belvisi, R. Quartau, C. Romagnoli, D. Casalbore, J. Madeira, A. Rodrigues

Present-day sedimentary processes on the shelves of volcanic ocean islands: the study case of the southern shelf of Porto Santo Island (Madeira Archipelago) **205**
S. Innocentini, R. Quartau, D. Casalbore, M. Cachão, J. Madeira, R. Santos, A. Rodrigues

A morphometric database of submarine landslides offshore Portugal **209**
D. Gamboa, R. Omira, P. Terrinha

Short- to medium-term beach dynamics of a Northern-Portuguese coastal stretch: impact of local features, wave and wind actions **213**
A. Bio, J. A. Gonçalves, I. Iglesias, H. Granja, J. Pinho, L. Bastos

Importância dos parâmetros morfológicos na hidrodinâmica da praia da Vagueira **217**
P. A. Silva, F. Sancho, F. S. B. F. Oliveira, F. Santos, P. Baptista, J. P. Pinto

Coastline evolution of Corvo Island in the Azores archipelago: Preliminary results from the HAZARDOUS project **221**
R. Quartau, P. Redweik, L. Lopes, S. Innocentini

Holocene mineralogical and grain-size sedimentary record in the south-western Portugal shelf **225**
A. Oliveira, S. Cunha, J. Duarte, J. Pombo, N. Lapa, A. Vinhas, A. Rodrigues

Evaluation of sedimentological and geochemical datasets – Ria Formosa's case study **229**
S. Moreira, R. Santos, A. Oliveira, J. F. Duarte

Geomorfologia da plataforma continental do Algarve no sector compreendido entre o cabo de São Vicente e Albufeira **233**
A. Vinhas, A. Rodrigues

Sedimentary dynamics on volcanic island shelves, a case study of Faial, Azores **237**
E. Valente, R. Quartau, S. Moreira, M. Cachão, A. Bizarro

241 Main chemical features of submarine polymetallic nodules occurring in European Seas – – results from the MINDeSEA project
P. Ferreira, F. Gonzalez, T. Kuhn, J. Nyberg, E. Marino, MINDeSEA Team

245 Water column suspended sediment concentrations in the Western and Southern Portuguese shelf under winter conditions
R. Santos, A. Oliveira, A. I. Santos, N. Zacarias, A. Mateus

249 Grain-size analysis by a dynamic image analyzer
J. Pombo, A. Rodrigues

253 Textural analysis of sedimentary samples from different environmental sources: Comparison between standard sieve and dynamic image analysis methods
J. Pombo, A. Rodrigues

257 Machine Learning Aplicado ao Mapeamento Marinho: Caso de Estudo na Costa Oeste da Ilha da Madeira
D. C. P. Silva, L. C. Reis

261 The importance of bottom trawling as a process affecting sedimentation patterns in the Portuguese shelf and upper continental slopes
A. Campos, V. Henriques, M. Cachão, P. Fonseca, T. Drago

265 Geochemical and textural characterisation of surface sediments of the Professor Luiz Saldanha Natural Park and surrounding area: Preliminary Results
M. Mil-Homens, A. Veronez, Y. Nahoara, V. Magalhaes, P. Brito, J. Lobo-Arteaga

QUÍMICA E POLUIÇÃO DO MEIO MARINHO

271 Anthropogenic gadolinium as an emergent contaminant in the Tagus estuary
P. Brito, M. Caetano, M. Mil-Homens

275 Microplastics contamination in Ria de Aveiro, Ria Formosa, Mira and Mondego rivers
V. Morgado, L. Gomes, R. Bettencourt da Silva, C. Palma

279 Aquaculture planning – determination of biological and physico-chemical parameters to assess the potential of fish and shellfish offshore aquaculture
M. Mosqueira, A. Pombo, C. Borges, N. Zacarias, R. Esteves, A. Brito, C. Palma

283 An extension of the “Microplastics contamination in Ria de Aveiro, Ria Formosa, Mira and Mondego rivers”: Evaluation of the measurement uncertainty
V. Morgado, C. Palma, R. Bettencourt da Silva

285 AQUIMar: avaliação da presença de microplásticos na costa portuguesa
L. Gomes, V. Morgado, C. Palma

289 Avaliação metrológica de tendências da composição de áreas oceânicas por simulação Monte Carlo de informação georreferenciada – Um caso de Estudo
C. Borges, C. Palma, R. Bettencourt da Silva

293 Caraterização das massas de água das áreas da Plataforma Continental Portuguesa com potencial aquícola
C. Gonçalves, M. Santos, L. Gomes, A. Batista, C. Borges, C. Palma

297 Caraterização geoquímica das áreas da plataforma continental portuguesa com potencial aquícola
C. Gonçalves, M. Santos, R. Santos, G. Gomes, A. Batista, A. Oliveira, C. Palma

301 Índices de qualidade da água na Ria Formosa – uma ferramenta para avaliação do impacto de descarga de águas residuais
C. Correia, A. Matos, C. Ferreira, A. Barbosa, M. J. Lima, S. Caetano, J. Jacob, A. Cravo

305 Distribuição de Compostos Orgânicos em sedimentos superficiais de estuários e de zonas costeiras de Portugal Continental
P. Santos, T. Pulquério, J. Almeida, C. Palma

309 Method validation for inductively coupled plasma mass spectrometry determination of ten trace metals in undiluted seawater
P. R. Marques, P. Brito

Assessment and comparison of microplastic contamination in Atlantic navigation routes in the first semester of 2020 **313**
J. Almeida, L. Gomes, C. Singdahl-Larsen, N. Buenaventura, V. Morgado, M. Olsen, R. Bettencourt da Silva, C. Palma

Metais no estuário do Sado (2018-2020) **317**
J. Almeida, C. Palma, A. Brito

Microplastic pollution in the northern Portuguese coast: Preliminary results from the i-Plastic project **321**
E. Valente, C. Palma, A. Guilherme, F. Bessa, P. Sobral

PAHs em sedimentos superficiais em estuários e no litoral continental português **325**
R. Gaspar, A. C. Rocha, C. Palma, M. Eusébio

Desenvolvimento e comparação de métodos de identificação da origem de derrames petrolíferos **329**
A. C. Rocha, C. Palma, R. J. N. Bettencourt da Silva

TECNOLOGIAS DO MAR

Uncrewed Surface Vehicles Network Initiative in support to EOOS **335**
C. Barrera, J. Tasso-Sousa, C. Waldmann, J. Burris, A. Cianca

Construção e teste de um sistema para trabalhos de acústica submarina em tanque anecóico **339**
M. Barreto, M. Gatta, V. Lobo

Ensaios em Modelo Físico para Análise do Surf na Praia da Vagueira **343**
A. Mendonça, C. J. E. M. Fortes, F. Duarte, R. Reis, C. Costa, C. Caeiro

Wave Overtopping at Ericeira harbour. Validating SWASH and NN_OVERTOPPING2 estimations with video. **347**
A. C. Zózimo, A. Manz, J. L. Garzon, C. J. E. M. Fortes, M. T. Reis, R. Capitão, R. Taborda, A. M. Silva

The EU project RAMONES – continuous, long-term autonomous monitoring of underwater radioactivity **351**
P. Batista, D. Cabecinhas, L. Sebastião, A. Pascoal, T. Mertzimekis, K. Kebkal, A. Mallios, K. Karantzalos, K. Nikolopoulos, J. Escartín, L. Maigne

The EU project BlueRoSES – Blue Robotics for Sustainable Eco-friendly Services **355**
D. Cabecinhas, L. Sebastião, A. Pascoal, M. Caccia

Generation WAVY: a New Breed of Surface Drifters for all Ocean Domains **359**
A. Jorge da Silva, A. Sousa, F. Pedrera, J. del Rio, J. P. Pinto, M. Oliveira, P. Gonçalves, P. de Saint Léger, R. Chumbinho

INFRAESTRUTURAS DE DADOS ESPACIAIS DO MAR

Planos de gestão de dados… um must! **365**
S. Almeida, M. Alves, P. Nunes

CoastSat – Figueira da Foz coastline extraction from Sentinel-2 images **369**
P. Nunes, L. Veiga, D. Carinhas

Sentinel 1 – Digital Elevation Model (10 meters) adjustment **373**
P. Nunes, L. Veiga, C. Torres

A rede Argo na área do Atlântico nordeste (Portugal continental e arquipélagos dos Açores e Madeira) **377**
R. Pinheiro, P. Martins, T. Silveira, J. Teixeira, M. Carapuço

Índice de Autores **381**

I.

Comissões

COMISSÃO DE HONRA (Portugal)

Ministra da Defesa Nacional, *Prof.ª Doutora Maria Helena Chaves Carreiras*
Ministro da Economia e do Mar, *Prof. Doutor António Costa e Silva*
Ministro do Ambiente e da Ação Climática, *Dr. Duarte Cordeiro*
Presidente da Câmara Municipal de Lisboa, *Eng.º Carlos Moedas*
Presidente da Câmara Municipal do Seixal, *Eng.º Joaquim Santos*
Chefe do Estado-Maior General das Forças Armadas, *Almirante António Silva Ribeiro*
Chefe do Estado-Maior da Armada, *Almirante Henrique Gouveia e Melo*
Reitor da Universidade de Lisboa, *Professor Doutor Luís Manuel dos Anjos Ferreira*
Reitor da Universidade Nova de Lisboa, *Professor Doutor João Sàágua*
Reitor da Universidade do Porto, *Professor Doutor António Sousa Pereira*
Reitor da Universidade de Aveiro, *Professor Doutor Paulo Jorge*
Reitor da Universidade dos Açores, *Professor Doutor João Luís Roque Baptista Gaspar*
Reitor da Universidade da Madeira, *Professor Doutor Sílvio Fernandes*
Reitor da Universidade do Algarve, *Professor Doutor Paulo Águas*
Presidente do Comité Português para a Comissão Oceanográfica Intergovernamental da UNESCO, *Prof. Doutor Luís Menezes Pinheiro*
Presidente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil I.P., *Investigadora-Coordenadora Laura Maria Mello Saraiva Caldeira*
Presidente do Instituto Nacional de Engenharia e Geologia, *Prof.ª Doutora Teresa Ponce de Leão*
Presidente do Instituto Português do Mar e da Atmosfera I.P., *Prof. Doutor Miguel Miranda*
Diretora-Geral de Política do Mar, *Doutora Helena Vieira*
Secretário-Geral da Organização Hidrográfica Internacional, *Dr. Mathias Jonas*
Comandante da Escola Naval, *Contra-almirante Valentim José Pires Antunes Rodrigues*
Presidente da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, *Professora Doutora Helena Pereira*
Presidente da Academia de Marinha, *Almirante Francisco Vidal Abreu*
Presidente da Fórum Oceano, *Dr. António Nogueira Leite*
Presidente do Colégio Nacional de Engenharia Geográfica, *Eng.º João Agria Torres*
Vice-almirante Carlos Manuel da Costa Ventura Soares (na qualidade de Hidrógrafo mais antigo no ativo)

COMISSÃO DE HONRA (Espanha)

Almirante de Acción Marítima, *Vicealmirante Juan L. Sobrino Pérez-Crespo*
Almirante Director de Enseñanza Naval, *Contralmirante Alfonso Delgado Moreno*
Director del Real Observatorio de la Armada, *Capitán de Navío D. Antonio Angel Pazos García*
Rector del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (UNICAN), *D. Ángel Pazos Carro*
Director de Investigación del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Cantabria, *D. Iñigo Losada Rodríguez*
Vicerrectora Política Científica y Tecnológica de la Universidad de Cádiz (UCA), *Doña María Jesús Mosquera Díaz*
Directora en funciones del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), *Doña Ana María Alonso Zarza*
Decano de la Facultad de Ciencias del Mar de la Universidad de Vigo, *D. Miguel Ángel Nombela Castaño*
Rector de la Universidad de Cádiz (UCA), *D. Francisco Piniella Corbacho*
Director del Instituto Geográfico Nacional (IGN), *D. Lorenzo García Asensio*
Director del Instituto Español de Oceanografía (IEO), *D. Javier Ruiz Segura*
Director del Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire (CECAF), *Coronel D. Fernando Sánchez-Arjona Lamparero*
Director del Centro Geográfico del Ejército de Tierra (CEGET), *Coronel D. Francisco Javier Galisteo Cañas*
Rector de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), *D. Guillermo Cisneros Pérez*
Rector de la Universidad de Jaén (UJA), *D. Juan Gómez Ortega*

COMISSÃO ORGANIZADORA

José António Velho Gouveia, IH (presidente)
José María Bustamante Calabuig, IHM
Gustavo Gómez-Pimpollo Crespo, IHM
Isabel Salgueiro da Cruz, IH

Telmo Geraldes Dias, IH
Nuno Pereira da Costa, IH
Zélia Matos Cardoso, IH

COMISSÃO CIENTÍFICA

Aurora Rodrigues Bizarro, **IH (presidente)**
Alberto Fernández Ros, **Armada Española, IHM**
Alejandro Ortega Felipe, **Armada Española, IHM**
Ana Isabel Santos, **IH**
Ana Navarro, **FCUL**
Ana Pombo, **IPL**
Anabela Campos Oliveira, **IH**
António Costa Canas, Marinha, **EN**
Carla Palma, **IH**
Carlos Santos Fernandes, **Marinha, IH**
Carlos Videira Marques, **Marinha, IH**
Felipe De Castro Maqueda, **Armada Española, ESHIDRO**
Flávio Martins, **UALg**
Gustavo Gómez-Pimpollo Crespo, **Armada Española, IHM**
Helena Ribeiro, **DGT**
Isabel Bué, **Marinha, IH**
Joaquim Pombo, **IH**
João Catalão Fernandes, **FCUL**
João Delgado Vicente, **Marinha, IH**
José Antonio Terrón Tejero, **Armada Española, ESHIDRO**
Jose Luis Sánchez de Lamadrid, **Armada Española, IHM**
Jose Manuel Quijano De Benito, **Armada Española, IHM**
Jose María Bustamante Calabuig, **Armada Española, ESHIDRO**
Jose María Cordero Ros, **Armada Española, IHM**
José Paulo Pinto, **IH**
José Ramón Torres García, **Armada Española, IHM**
Leonor Veiga, **IH**
Luis Miguel Rioja Gallo, **Armada Española, IHM**
Luís Quaresma dos Santos, **Marinha, IH**
Luísa Lamas, **IH**
Marcos Larrad Revuelto, **Armada Española, IHM**
Maria Conceição Freitas, **FCUL**
Maria João Bebianno, **UALg**
Mário Cachão, **FCUL**
Miguel Ángel Lobeiras De la Cruz, **Armada Española, IHM**
Miguel Bessa Pacheco, **Marinha, IH**
Miguel Moreira, **Marinha, CINAV**
Mónica Ribeiro, **IH**
Oscar Ortega Pérez, **Armada Española, IHM**
Paula Freire, **LNEC**
Paula Sanches, **IH**
Paulo Antunes Nunes, **Marinha, IH**
Ricardo Silva, **FCUL**
Rita Ramos, **APL**
Rui Quartau, **IH**
Rui Taborda, **FCUL**
Rui Teodoro, **IGEOE**
Salvador Espinosa González-Llanos, **Armada Española, IHM**
Sandra Moreira, Marinha, **IH**
Santiago Rubén Díaz Portillo, **Armada Española, IHM**
Telmo Geraldes Dias, **Marinha, IH**
Telmo Morato, **UAçores**
Teotónio Barroqueiro, **Marinha, IH**
Teresa Drago, **IPMA**
Vanda Brotas, **FCUL MARE**
Virgílio Mendes, **FCUL**

II.

Patrocinadores e Apoios

KONGSBERG MARITIME

3P – CONSULTORES

FUGRO

QUALITAS INSTRUMENTS

GISCAD – GEOMÁTICA & ENGENHARIA

ADMINISTRAÇÃO DO PORTO DE LISBOA

ADMINISTRAÇÃO DO PORTO DE SETÚBAL

PROJETO AQUIMAR

PROJETO 4S

ESRI PORTUGAL


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
KONGSBERG
km.kongsberg.com

III.

Nota introdutória

Depois de um período de restrições, impostas pela pandemia por SARS-CoV-2, o Instituto Hidrográfico (IH), de Portugal, decidiu realizar as 7.as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, em modo presencial, e, conjuntamente com o Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM), de Espanha, as 2.as Jornadas Luso-Espanholas de Hidrografia. As Jornadas Luso-Espanholas, cuja primeira edição foi realizada em 2020, expandem a comunidade de interesse internacional que debate as matérias aqui abordadas; ao mesmo tempo que reforça os laços de cooperação e interligação que unem as duas instituições.

Os resumos alargados, que constam neste livro de atas, correspondem aos trabalhos apresentados nestas 7.as Jornadas de Engenharia Hidrográfica e 2.as Jornadas Luso-Espanholas de Hidrografia, realizadas nas instalações do IH, em Lisboa, durante os dias 21, 22 e 23 de junho de 2022. O objetivo das Jornadas é a criação de um fórum de natureza técnica e científica, no qual possam ser tratadas matérias relacionadas com o conhecimento do ambiente marinho.

Do conjunto de trabalhos submetidos à Comissão Científica das Jornadas, foram aceites 88, sendo 73 na forma de apresentação oral e 15 na forma de póster. Este número é sinal de grande dedicação e empenho por parte dos respetivos autores que, mesmo em tempo de pandemia, continuaram a produzir ciência e conhecimento de relevância internacional.

As comunicações foram divididas pelas áreas temáticas de hidrografia, cartografia, segurança da navegação, oceanografia, geologia marinha, química e poluição do meio marinho, tecnologias do mar e infraestruturas de dados espaciais do mar. Estes temas demonstram bem a variedade de matérias em análise e que poderão dar origem a novos trabalhos de investigação tanto de conhecimento aplicado, como de exploração sustentável, ou de proteção e preservação do meio marinho.

Em nome do IH, endereço uma palavra de agradecimento aos membros da Comissão de Honra, que conferiram um prestígio acrescido ao evento; e a todos os envolvidos na organização e na realização das 7.as Jornadas de Engenharia Hidrográfica e das 2.as Jornadas Luso-Espanholas de Hidrografia, nomeadamente à Comissão Científica e à Comissão Organizadora, pela disponibilidade e cuidado que dedicaram às tarefas que lhes foram propostas.

Uma palavra de reconhecimento é também devida aos participantes, nas diversas modalidades, fazendo votos que este evento tenha contribuído para uma frutífera partilha de ideias e experiências, enriquecendo, assim, o seu conhecimento pessoal, profissional e científico.

Finalmente, merece um destaque especial o contributo das empresas e instituições, públicas e privadas, nacionais e estrangeiras, que, através do seu patrocínio, potenciam a criação de novas oportunidades de parceria, em projetos de investigação científica relacionados com o mar.

Em plena Década das Ciências do Oceano para o Desenvolvimento Sustentável 2021-2030, desejo vivamente que o trabalho associado a estas Jornadas contribua para aumentar e melhorar o conhecimento do mar e, concomitantemente, para o desígnio desta relevante iniciativa das Nações Unidas.

O DIRETOR-GERAL

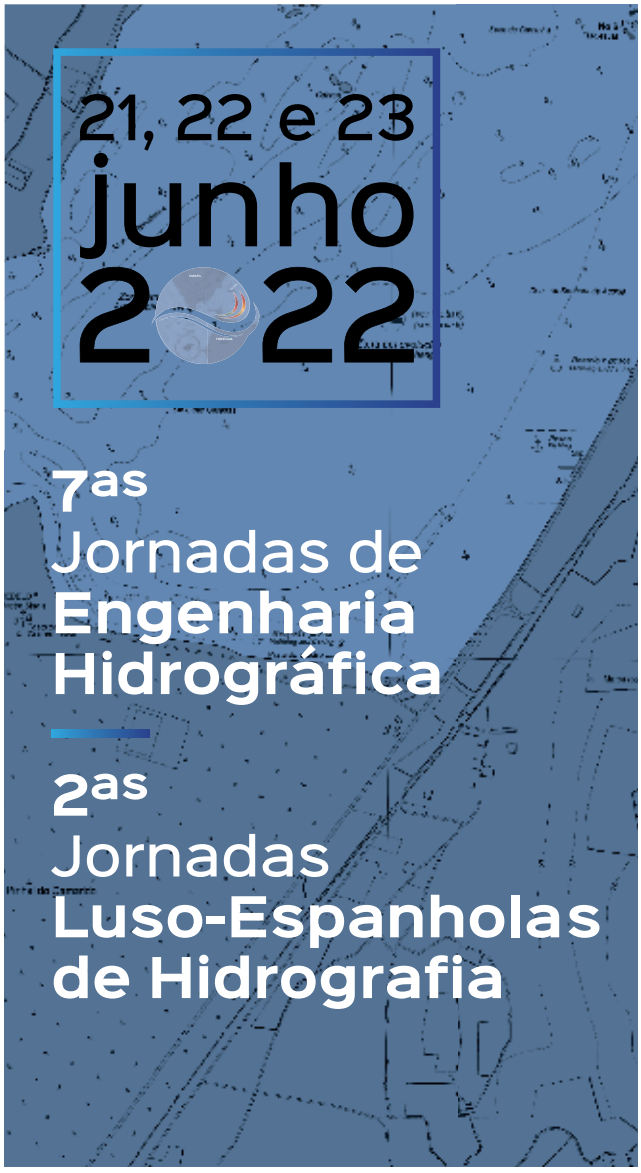


Mário José Simões Marques
Contra-almirante

IV.

Resumos Alargados

HIDROGRAFIA



La necesidad de renovar la Flotilla Hidrográfica del Instituto Hidrográfico de la Marina

G. Gómez-Pimpollo Crespo (1)

(1) Instituto Hidrográfico de la Marina, Cádiz. g.gomez-pimpollo@mde.es

Secretaría técnica del IHM

Resumen: Los barcos hidrográficos que dispone la Armada Española, para llevar a cabo la responsabilidad de Estado en materia de cartografía náutica y seguridad en la navegación, tienen más de 47 años de servicio, lo que hace muy necesario modernizar la actual Flotilla Hidrográfica, sustituyendo las actuales plataformas por un Buque Hidrográfico Oceánico (BHO) Multidisciplinar, dos Buques Hidrográficos Costeros (BHC) y 5 lanchas hidrográficas (LL.HH.), dos de ellas a bordo del BHO. Esta necesidad de renovación es urgente, empezando por los BHC, ya que solo queda uno de los cuatro que había en servicio. Además, este barco, el BH "Antares", tiene importantes limitaciones por obsolescencia o capacidad que impacta directamente en su eficacia en el cumplimiento de su misión. En este artículo, además de indicar la propuesta de la futura Flotilla Hidrográfica, se muestra el motivo por el cual es necesario incrementar el número de plataformas en nuestras aguas someras.

Palabras clave: buques hidrográficos, evaluación medioambiental, flota hidrográfica, oceanográfico, seguridad.

1. INTRODUCCIÓN

El Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) es un organismo de la Armada de interés público nacional e internacional cuya misión principal es la de garantizar la seguridad de la navegación mediante la obtención y difusión de información sobre el mar y litoral, dar apoyo medioambiental y GEOMETOC a la fuerza naval de España, así como contribuir al progreso de la ciencia náutica.

Los cambios en el litoral por la acción humana, la proliferación de tráfico marítimo de toda clase, el alto número de puertos nacionales, la continua evolución tecnológica y los cambios en las normas técnicas de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) hacen que los trabajos de actualización de la cartografía náutica nacional tengan carácter permanente.

Los actuales buques hidrográficos (BB.HH.) del IHM tienen más de 47 años de servicio y dos de las tres Lanchas Hidrográficas (LL.HH.) tienen más de 18 años de servicio. Además, los BB.HH. presentan serias carencias debidas a su antigüedad, que ya no son solucionables mediante modificaciones. Entre las carencias más importantes cabe destacar las siguientes:

- Escasa maniobrabilidad para determinadas tareas hidrográficas, derivada del diseño de la propulsión.
- Nivel de ruido muy elevado que afecta sensiblemente al rendimiento de los modernos equipos acústicos.
- Nula capacidad para poder llevar a cabo otros trabajos complementarios a la adquisición de datos hidrográficos, necesarios para garantizar la navegación segura o la seguridad de otras actividades humanas en la mar como son, entre otras: el despliegue de equipos que requieren posicionamiento submarino preciso, tales como el sonar de barrido lateral o los vehículos operados de forma remota (ROV), adquisición de datos de corrientes y la adquisición de datos de las primeras capas del subsuelo marino.
- Nula capacidad para efectuar operaciones medioambientales (REA) y GEOMETOC en el litoral.
- La vejez del equipamiento de la plataforma conlleva a los BB.HH. tener dotaciones sobredimensionadas para las posibilidades actuales.
- Maniobra de botes limitadas.
- Dificultades muy elevadas de sostenimiento por la antigüedad de los sistemas del buque y la dificultad de encontrar repuestos.

A parte de lo indicado anteriormente, la evolución de la doctrina aliada hacia estructuras más potentes en apoyo REA y GEOMETOC, unido al plan iniciado recientemente por el IHM de obtener capacidades de desarrollo de modelos predictivos específicos para operaciones militares y de impulsar la recogida de datos del fondo marino en zonas polares, hace necesario dotar a la futura Flotilla Hidrográfica (FH) de un BHO multipropósito, que sea capaz de integrarse en una Fuerza Naval para proporcionar el apoyo oceanográfico necesario al mando y para desarrollar la capacidad hidrográfica en cualquier escenario, tanto conocido como remoto, como son las regiones polares árticas y antárticas.

Por tanto, este artículo muestra el análisis realizado para determinar de manera eficiente la futura FH, de acuerdo con el escenario de actuación del IHM para cumplir con las misiones asignadas.

2. ESCENARIO DE ACTUACIÓN

La FH apoya al IHM en velar por la seguridad de la navegación en sus aspectos de obtener y difundir información sobre el mar y el litoral y contribuir al progreso de la Ciencia Náutica.

Para ello, realiza levantamientos hidrográficos y estudios del relieve submarino en nuestras costas y zonas marítimas, así como en otras zonas que asume, como consecuencia de su compromiso con la OHI, donde representa al Estado Español.

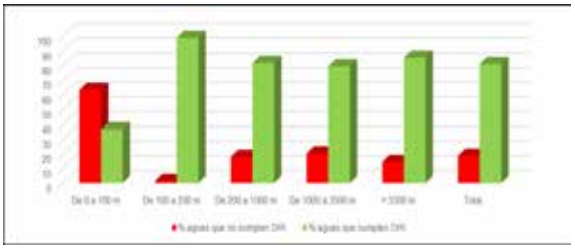
Las áreas de actuación del IHM para cumplir sus misiones son las siguientes:

- Escenarios en espacios marítimos de soberanía nacional, que abarcan desde la línea de costa (8.000 km aproximadamente) hasta los límites de la Zona Económica Exclusiva Española (ZEEE) o de la ampliación de la plataforma continental, destacando los puertos marítimos, sus accesos y alrededores.
- Escenarios alejados donde existan intereses nacionales, bien de carácter científico, como el caso de la Antártida, o bien en cualquier otro donde sea necesario proporcionar a la Fuerza un apoyo GEOMETOC.
- Aguas internacionales donde España es responsable, por mandato de la OHI, de la publicación de cartas náuticas internacionales (área noroeste de África y las zonas de responsabilidad española en la Antártida) o cuando por acuerdos específicos se requiera nuestra colaboración para levantamientos hidrográficos.

España dispone de 245 puertos marítimos, clasificados en base a los servicios prestados y al nivel de gestión que realizan (comercial, pesquero, transporte de pasajeros, astilleros navales y deportivos) y en muchos de ellos se realizan mejoras y actualizaciones regulares, como ampliaciones de espigones, muelles, dragados, etc.

Conforme a las normas en vigor de la OHI, las zonas pendientes de cartografiar en territorio nacional hasta el límite de la ZEEE tienen una extensión total de 248.000 km^2 aproximadamente, además de las continuas peticiones que se reciben para actualizar la batimetría de nuestros puertos (tras la realización de dragados, creación o ampliación de muelles, entre otras).

La siguiente figura muestra gráficamente el tanto por ciento (%) de las aguas españolas, por rango de profundidades, que cumplen y no cumplen las normas establecidas por la OHI.



Tab. i. Comparativa de áreas, por rango de profundidades, que cumplen y no cumplen las normas de la OHI (publicación S-44, 6ª edición)

En vista de lo indicado anteriormente y con la necesidad de velar por la seguridad en la navegación, se requiere que las nuevas plataformas de la futura FH aumenten sus esfuerzos en las aguas por debajo de los 100 m de profundidad, especialmente en las aguas donde hay elevado tráfico marítimo y la separación quilla-fondo es crítica (zonas portuarias, canales de navegación y alrededores principalmente).

3. ACTUAL FLOTILLA HIDROGRÁFICA

La actual FH está formada por los siguientes medios:

- Dos (2.-) buques hidrográficos (BB.HH.) clase «Malaspina» (BH «Malaspina» y BH «Tofiño»).
- Un (1.-) buque hidrográfico costero (de los cuatro costeros originales de la clase «Cástor»), el BH «Antares».
- Tres (3.-) lanchas hidrográficas transportables: «Astrolabio» y «Escandallo», recibidas en los años 2001 y 2004 respectivamente, y «Sondaleza», de 2014.

La vejez de los barcos, en servicio desde los años 70, obliga a renovar la actual FH para evitar que el IHM vea comprometido el cumplimiento de sus misiones y responsabilidades principales, y así permitir que España continúe cumpliendo con sus obligaciones y compromisos con la comunidad internacional. Asimismo, esta renovación es necesaria para poder contar con recursos adecuados que permitan al IHM proporcionar a la Fuerza un apoyo eficaz en el ámbito REA y GEOMETOC, tanto para ejercicios como para operaciones.

4. FUTURA FLOTILLA HIDROGRÁFICA

La vejez de nuestra FH y el carácter de misión de Estado que tiene el IHM de forma permanente, pide a gritos su reemplazo con plataformas acordes al siglo XXI (silenciosas y adaptadas con tecnología de vanguardia para obtener de su equipamiento acústico el máximo rendimiento posible) para garantizar eficazmente el cumplimiento de su misión.

Por tanto, la propuesta del IHM para renovar la actual FH es la siguiente:

- Un BHO multidisciplinar con capacidad polar, cuyas capacidades estarán orientadas principalmente para dar apoyo

REA/GEOMETOC a las operaciones navales, realizar levantamientos hidrográficos y oceanográficos en cualquier escenario global, así como realizar campañas de investigación científica (con cometidos en el conocimiento marino y sostenimiento de los océanos) y de colaboración con la OHI.



Fig. 1. Prototipo buque hidrográfico oceánico multidisciplinar deseado (fuente: revista Naval news).

- Dos BHC, con sus botes hidrográficos y vehículos de superficie autónomos (USV), para realizar levantamientos hidrográficos, dar apoyo REA/GEOMETOC y apoyo a operaciones de conservación del patrimonio arqueológico subacuático en su área de actuación (desde la línea de costa hasta el veril de 200 m).



Fig. 2. Buque hidrográfico costero "Ángeles Alvariño" (fuente: Instituto Español de Oceanografía).

- Cinco LL.HH. (al menos dos de ellas desplegadas desde el BHO e incluso que puedan ser transportadas por tierra) para garantizar la seguridad de la navegación en zonas portuarias, canales de navegación y cerca de costa principalmente.



Fig. 3. Lancha hidrográfica de menor porte, 9 metros aproximadamente, transportable por tierra (fuente: empresa Danesa Le34).



Fig. 4. Lancha hidrográfica de tamaño medio, de eslora 13 metros aproximadamente (fuente: Barco Stan tender 1505 del Astillero holandés Damen).

5. CONCLUSIONES

La necesidad de reemplazar la actual FH es urgente por tratarse de barcos con más de 47 años de servicio con serias carencias debidas a su antigüedad, que ya no son solucionables mediante modificaciones como se ha indicado anteriormente.

Además, la evolución de la doctrina aliada hacia estructuras más potentes en apoyo REA y GEOMETOC, unido al plan iniciado recientemente por el IHM de obtener capacidades de desarrollo de modelos predictivos específicos para operaciones militares y de impulsar la recogida de datos del fondo marino en zonas polares, hace necesario disponer de una plataforma multidisciplinar con capacidad de actuar en cualquier escenario, desde su integración en una Fuerza Naval para dar apoyo REA/GEOMETOC hasta su capacidad para realizar levantamientos hidrográficos en las regiones polares.

De esta manera, la distribución de los trabajos de las unidades de la futura FH, por rango de profundidades, sería el siguiente:

- De 0 a 30/35 metros: 5 LL.HH., 2 botes hidrográficos de los BHC, 2 USV y 2 ROV.
- De 30/35 a 200/250 metros: 2 BHC más todo el equipamiento hidrográfico de aguas muy someras.
- De 100 metros a aguas profundas: el BHO.

Y el concepto de su empleo operativo se materializaría en:

- Un notable aumento en la capacidad de efectuar levantamientos hidrográficos en aguas por debajo de los 100 metros de profundidad, para mantener la seguridad en la navegación, especialmente en los puertos y en las aguas próximas a éstos, por debajo de los 35 metros de profundidad principalmente.
- Implementar la capacidad de apoyo REA y GEOMETOC al mando, desde la FH, contando con un BHO multipropósito que tenga la capacidad de actuar en cualquier escenario y pudiendo ser integrado en una fuerza nacional o multinacional para generar productos

geoespaciales compatibles con los sistemas de mando y control, de acuerdo con la doctrina *Geospatial information NATO* y la doctrina nacional actualmente en desarrollo.

- La posibilidad de participar en proyectos y campañas con la comunidad nacional e internacional, tanto en el ámbito de la Cartografía como en el de la Investigación.
- Incrementar la eficiencia en el empleo de plataformas, personal y recursos necesarios para la producción cartográfica de España.

La siguiente figura muestra de manera ilustrativa el escenario de actuación de la futura FH deseada:



Fig. 5. Escenario de actuación de la futura Flotilla Hidrográfica.

Agradecimientos

Al CC Juan B. Manzano Ruiz y al CC Luis R. Díaz Obregón por el apoyo prestado estos años en el desarrollo de la documentación de los BHC.

REFERENCIAS

EU Finances the Construction of 3 New Hydrographic Vessels for the Italian Navy - Naval News

https://www.ba.ieo.es/es/los-nuevos-buques-del-ieo/949-bo-angeles-alvarino

https://www.le34.dk/en/sectors/ports

https://products.damen.com/es-es/ranges/stan-tender

Hydro international (2022), barco hidrográfico "Patriot" de la empresa holandesa *Braveheart Marine, p. 11.*

Using airborne lidar bathymetry to map the coastal zone

C. de Jongh (1), B. Larsen (1)

(1) Terratec, Vækerøveien 3, 0281 Oslo, Norway. Charles.deJongh@Terratec.no

Abstract: Terratec is using the very powerful and state of the art CZMIL SuperNova airborne bathymetric lidar sensor to execute hydrographic surveys. CZMIL stands for Coastal Zone Mapping and Imaging Lidar. The green lidar in the sensor can penetrate the water to map depths with high density and accuracy. In the area around the coastline this technique is much more efficient than traditional hydrographic surveying methods, like using a multibeam echosounder. Another advantage is the ability to simultaneously survey land and water to create a seamless topographic/bathymetric elevation model. This article will focus on the advantages of the airborne Lidar bathymetry technique, Terratec's sensor as well as a successful survey executed for the Norwegian Mapping Authority.

Key words: bathymetry, coastal zone, lidar.

1. THE ADVANTAGES OF AIRBORNE LIDAR BATHYMETRY

Lidar (also LiDAR or LIDAR), which stands for Light Detection and Ranging, is a remote sensing method that uses light in the form of a pulsed laser to measure ranges (variable distances) to the Earth (NOAA, 2021).

Airborne Lidar Bathymetry (ALB) can be defined as a remote sensing technique for measuring the depths of relatively shallow coastal and inland water bodies with a pulsed scanning laser from the air (Guenther et al. 2000).

A green laser pulse is shot downwards from a Lidar sensor in an aircraft, helicopter or aerial drone flying over water. Green laser light is used as this frequency can best penetrate the water. The light hits the water surface, penetrates the water column, and reflects from the bottom, back to the sensor in the aircraft.

The essence is that the sensor digitizes the incoming light photons, which results in a waveform and the difference in time between the water surface and water bottom can be measured to define the water depth, based on the speed of light.

For bathymetric measurements, sonar is the most used technique, which is using sound to measure water depth. Note however that where sound moves with about 1.5 kilometres per second through water, light moves with about 225.000 kilometres per second, so measuring with light is about 150.000 times faster and is done very precisely to get an accurate depth result.

The first experiments with ALB have been executed more than 50 years ago, but over the years the ALB technique has of course improved significantly, with faster lasers resulting in higher point densities, more accurate photon detection equipment as well as more advanced processing software.

With the current ALB sensors laser pulses are normally sent out tens of thousands of times per second from the sensor and the result, when combined with precise positioning, is a geospatial point cloud with high density and accurate bathymetric depth measurements. ALB is also a very fast and therefore cost-effective method for surveying shallow areas that are difficult or impossible to reach with multibeam sonar.

It of course depends on the ALB sensor, type of airborne platform and the shape of the area to survey, but when you for example fly over an area with around 250km per hour and a swath width of 300m you can survey 10 to 20 square kilometres per hour.

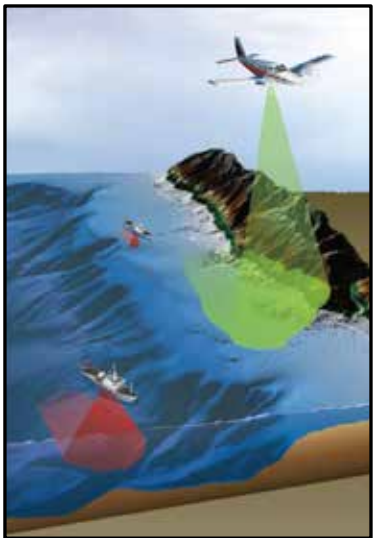


Fig. 1. The advantages of ALB visualized: a highly effective survey method for shallow areas that are hard or impossible to reach by multibeam (graphic courtesy of Dewberry).

This is much faster than with a multibeam echosounder, specifically in very shallow areas where a multibeam only has a limited swath width, as can be seen on figure 1. Surveying 10 square kilometres in such a shallow area would take multiple days instead of an hour.

Another advantage is that with a bathymetric Lidar sensor you can next to mapping underwater elevations, also simultaneously map the topographic elevations on land, providing a seamless elevation model of the coastal zone and therewith you can map gaps that often exist in this area.

What needs to be taken into account with an ALB survey is that you are depending on the laser light to penetrate the water column to the bottom and return back to the sensor, to be able to measure the bottom. This only works until a certain depth range, depending on the sensor and local physical circumstances of the water (see paragraph 3).

So, ALB should probably be seen as a technique that is, at least in some use cases, complementary with the use of a multibeam echosounder, as is also nicely visualized in figure 1. An efficient way to survey an area could for example be to use ALB to survey the shallow area and use multibeam to fill the remaining gaps in the deeper area.

The global bathymetric Lidar market is really a niche market within the total hydrographic survey market. The demand for ALB is clearly growing though, based on an increased demand for coastal zone mapping, for both economic and environmental reasons. Furthermore the technique is also very appropriate for the mapping of other water bodies, like rivers and lakes.

2. TERRATEC ALB EQUIPMENT

Terratec is a Norwegian geospatial survey company that specializes in ALB surveys. The bathymetric Lidar sensor that Terratec uses is called the CZMIL SuperNova, where CZMIL stands for Coastal Zone Mapping and Imaging Lidar.

The CZMIL is developed by Teledyne Optech in cooperation with the United States Army Corps of Engineers (USACE). Teledyne Optech has worked with bathymetric Lidar since the 1970's so they have almost 50 years of experience with this technique (Philpot, 2019).

The CZMIL has been in use since 2012 and was upgraded to the CZMIL Nova in 2015. The sensors are currently used by USACE, the US Navy and other government mapping agencies around the world.

Almost the whole US coastline has been mapped with it since, some areas even multiple times. Compared with traditional surveying techniques, using the CZMIL saves around $18.000 and 12 days of surveying per mile of coastline.

The bathymetric Lidar data is not only used for nautical charting, but also for geological research, flood mapping, storm modelling and all sorts of coastal zone management applications (US Army Engineer Research and Development Center, 2020)

The CZMIL SuperNova is the recent upgrade of the Nova, released in 2021, with many improvements. It basically contains the latest and greatest when it comes to bathymetric Lidar.

Due to a higher pulse frequency it has double the point density of the Nova (around 8 points per m^2), it is the ALB sensor with the best depth penetration for deep and turbid waters and due to improved digitizer technology the survey accuracy is within IHO Special Order for the shallow channels.

CARIS software and algorithms are used for the processing of the data, including deep learning tools for land-water classification and Lidar noise classification.



Fig. 2. Terratec equipment for ALB surveys.

Terratec is the first owner of the CZMIL SuperNova and actually the first commercial company that has such an advanced bathymetric Lidar sensor available.

Terratec owns two Cessna Grand Caravan aircraft in which the SuperNova can be installed. Figure 2 shows one of them in the hangar, and as well when executing a survey. For bathymetric Lidar surveys flights are usually executed at 120 to 140 knots, which is around 250 kilometres per hour and the flying height is 400 to 600 meter above ground level.

The picture on the right of figure 2 shows the sensors installed in the aircraft. You can see the SuperNova, which contains an Applanix POS AV intertial measurement unit (IMU) and Global Navigation Satellite System (GNSS) receiver for positioning.

The CZMIL SuperNova has an integrated PhaseOne 150-megapixel RGB camera and with the 50mm Rodenstock lens the image resolution is approximately 3 cm (from 400 m altitude). The dynamic range of the camera provides excellent imagery, even at 10 degrees sun angle, and provides a detailed view of the seafloor when conditions allow.

An advantage that Terratec's aircraft have as well is that they have two hatches (i.e. holes in the bottom), where sensors can be installed. This makes it possible to combine the SuperNova and Phase One camera, using one hatch, with other sensors using the other hatch for a simultaneous survey. On figure 2 it can be seen for example that two very advanced hyperspectral cameras are installed as well, the Hyspex VNIR-1800 and the SWIR-384, that cover both the visible light, near infrared as well as the

short-wave infrared spectral regions. With these cameras the spectral signature of features can be measured with 26 and 60 cm resolution respectively (from 400m altitude).

The goal with these cameras, at least when combining them with bathymetric Lidar, is to for example recognize marine vegetation in the water column and potentially to also find out what kind of species are present.

After data collection the sensor data is processed at Terratec's office.

The basic product after processing is finished, is a clean and classified geospatial point cloud, with X, Y and Z coordinates indicating topographic elevations and bathymetric depths with high accuracy. Note that the data also contains many other meaningful attributes, like for example information about reflectance and uncertainties of individual points.

As part of the processed Lidar data, the full waveform of the original data can also be delivered, if that is required by the client for further analysis.

For the imagery are orthophotos and hyperspectral image cubes usual deliveries.

Depending on the client requirements many different types of products can be created and delivered by Terratec and some examples are shown in figure 3.

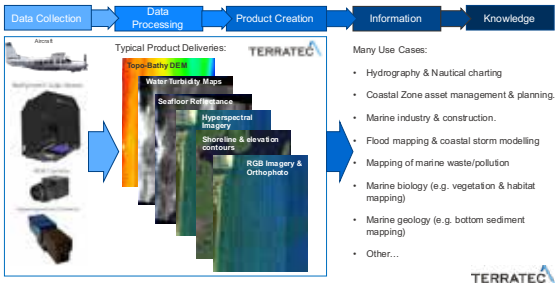


Fig. 3. Terratec Airborne Lidar Bathymetry: From Data to Knowledge

Looking at the use cases in figure 3 it is clear that the ALB data, which is collected once, can be used by many stakeholders for different use cases and as such have a significant economic and scientific value.

3. DEPTHS THAT CAN BE REACHED WITH ALB

The water depth that any bathymetric Lidar sensor can reach depends on its laser strength and the abilities and aperture of the photon detector in the sensor. Based on this the CZMIL SuperNova has the highest potential depth penetration of all systems that are available on the market. However, due to the important role that the physical conditions of the water play, the depths that can be reached vary enormously.

Figure 4 is showing depths that can be reached with the SuperNova, based on >15% bottom reflection and varying types of water optical properties, expressed using the diffuse attenuation coefficient (Kd), which is a measure of how light dissipates with depth in water.

Dirty, turbid water types are shown on the left of the X-axis and clean water shown on the right. The red line indicates the Secchi disk depth, an indicator of how deep into the water a round 30cm diameter white disk is visible. The green lines indicate the depths that can be reached with the respective shallow and deep channels of the SuperNova.

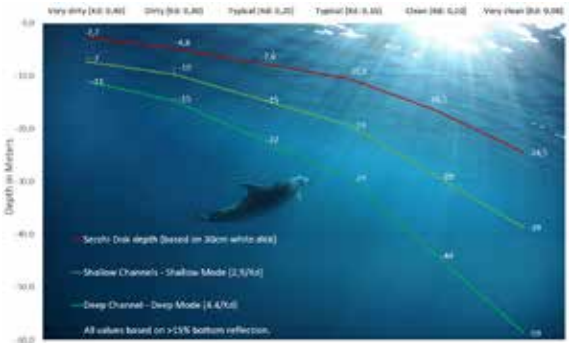


Fig. 4. CZMIL SuperNova depths that can be reached

With very turbid water that contains a lot of suspended material and/or algae in combination with a muddy bottom, most of the laser light is scattered and absorbed in the water column and will not return back to the sensor. In those circumstances you cannot penetrate deeper than a few meters, even with the strongest ALB sensors.

On the other hand, if the water is very transparent with a white sandy bottom, i.e. typical tropical island circumstances, you can reach more than fifty meters with a sensor like the SuperNova.

So having a good idea of turbidity in an area is very important for an ALB survey and Terratec always tries to make a good assessment of this for survey planning. Satellite imagery that indicates water turbidity as well as local water depth visibility measurements using a Secchi disk are very helpful for this.

As satellite data is available throughout the year for most of the world, at least for open seas, this allows making an advance assessment on what turbidity to expect in a region and get a better idea of local seasonal varieties, to define the expected best time period to execute a survey.

4. NORWEGIAN MARINE BASEMAPS PROJECT

Terratec participated in the Norwegian Marine Basemaps (Marine Grunnkart) project, which is a pilot project of the Norwegian Mapping Authority, together with the national Geological Survey and the Institute of Marine Research (Kartverket, 2022-1). The common goal of this project is to better and also more efficiently map the Norwegian coastal zone and

ALB is one of the main techniques that is being evaluated, as it's a fast and accurate surveying technique in shallow waters.

It should be noted that, after Canada, Norway actually has the longest coastline in the world, with a length of more than 100.000 kilometres including all the fjords and islands (Norwegian Government, 2015). However, good geospatial data of the coastal zone is actually scarce, as it is not an easy area to survey.

For the Marine Basemaps project Terratec executed ALB surveys in the Stavanger region on the west coast of Norway, where bathymetric Lidar was used in combination with high resolution RGB and hyperspectral imagery. The surveys were executed in April and July 2021.

Terratec's preparations for the survey consisted amongst others of flight planning and making a good assessment of the local water turbidity, based on satellite data and local water depth measurements, to assess what depths could be expected and when best to survey. The project area of about one hundred square kilometres was surveyed in two days and the resulting data was very impressive, with maximal depth returns of over thirty meters and with generally a high point density and full coverage almost everywhere in the required survey area.

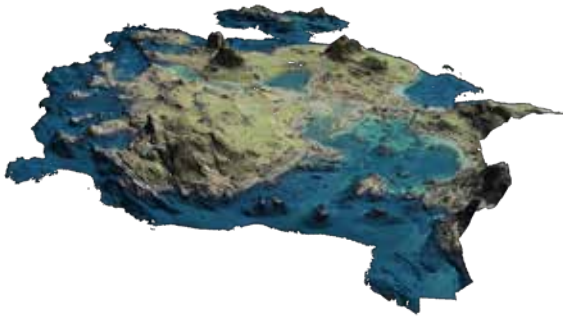


Fig. 5. Topo-bathymetric model of the islands Fjøløy & Klosterøy.

Figure 5 shows an orthophoto that is created based on imagery acquired during the same survey, draped over the digital elevation model of the acquired land elevations and the bathymetry in the area. This is a truly seamless topo-bathymetric elevation model, which was not possible to acquire by other means. Regarding the accuracy of the data: the Norwegian Mapping Authorities have compared the bathymetric Lidar data with accurate multibeam data in the same area and in general the two data types fit very well with each other, with average vertical differences at centimetre level, so they are very happy with the results.

What is interesting as well is that with airborne Lidar you do not only map the water bottom, but the whole water column, as objects within the water column also reflect Lidar light. This makes it possible to also map marine vegetation or other objects in the water. Figure 6 below shows for example a marine vegetation map of the area, with vegetation shown in green and a darker colour indicating more height.

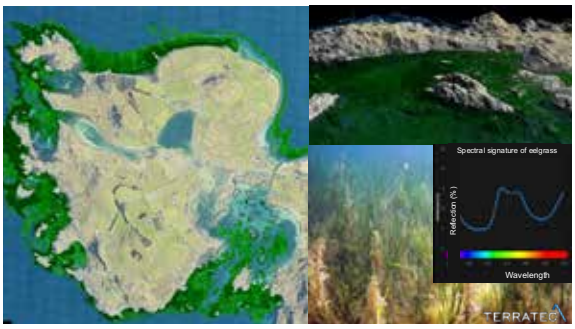


Fig. 6. Mapping marine vegetation using a sensor fusion of ALB and RGB/Hyperspectral imagery.

Furthermore, the Lidar data can be combined with the RGB and hyperspectral imagery, giving a high-resolution multiple wavelength view into the water. This enables a further quantification of the amount of marine vegetation, and potentially even vegetation types, based on spectral signatures.

The fusion of these sensors provides a treasure trove of information, which can be interesting not only for hydrographers and nautical charting but also for many other economic and scientific purposes.

Based on Terratec's as well as other project results the Marine Basemaps pilot project has been very successful and based on an enormous potential for sustainable value creation and employment along the coast (Kartverket, 2022-2), a multi-year national coastal zone mapping program will be created in Norway which should start soon. It is very likely that ALB will play a significant role in this project. Terratec looks forward to adding value to this as well as other global ALB projects.

REFERENCES

Guenther, Gary; Grant Cunningham et al. (2000): Meeting the accuracy challenge in airborne Lidar bathymetry. Proceedings of the 20th EARSeL Symposium.

Kartverket (2022-1), Et hav av muligheter, Marine Grunnkart i kystsonen flyer.

Kartverket (2022-2), Stor milepæl for Marine grunnkart i kystsona

NOAA (2021), What is lidar?

Norwegian Government (2015), Seas and coastlines - the need to safeguard species diversity.

Philpot, William (2019), Airborne Laser Hydrography II. Cornell University Library.

US Army Engineer Research and Development Center (2020). Civil Works Value to the Nation

'Collateral benefits' from the development of the Spanish Vertical Reference Surface for hydrography: deepening into the knowledge on sea-level changes

C. J. González (1), J. R. Torres (1), J. M. Quijano (1)

(1) Instituto Hidrográfico de la Marina. Plaza San Severiano 3, 11007 Cadiz, Spain. cgonmej@mde.es

Abstract: The development of the Spanish Vertical Reference Surface for Hydrography from model-reanalysis data provided significant insights into the long-term variability (from half a year to decades) of sea-level. Such results are interpreted using different proxies: air-pressure, water temperature, and net inflow through the Strait of Gibraltar. 19-year trends reproduce the sea-level rising observed at experimental stations. The spatial variability at western Mediterranean and Alboran Seas, related to the strengthening of mesoscale geostrophic gyres, seems to be related to global climate processes. Reanalysis data also reproduces the observed inter-annual variability of sea-level, showing large-scale changes related to the NAO index. Finally, reanalysis data were also capable of reproducing the SA (annual) and SSA (semi-annual) 'radiational' tides in the western Mediterranean-Alboran Seas. The SA tide is strongly related with oscillations in the Mediterranean water budget, while inverse-barometer and thermal expansion are the main causes for the SSA tide.

Keywords: model-reanalysis data, long-term sea-level changes, vertical reference surface for hydrography.

1. INTRODUCTION

Nautical charts for waters of Spanish jurisdiction are officially produced by the Spanish Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM), which is presently developing the Vertical Reference Surface for Hydrography (VRSH, identified with the lowest astronomical tide LAT) for Spanish waters. It was established from the Copernicus Marine Environment Monitoring System (CMEMS; marine.copernicus.eu) Iberia-Biscay-Ireland Monitoring and Forecasting Center model-reanalysis sea-level data fields (IBIre hereafter; Sotillo et al., 2015; Aznar et al., 2016), which were first validated and then adjusted to experimental data from 110 tide-gauge stations (Figure 1). Details on the methodology and analysis of results are shown in González et al. (2021).

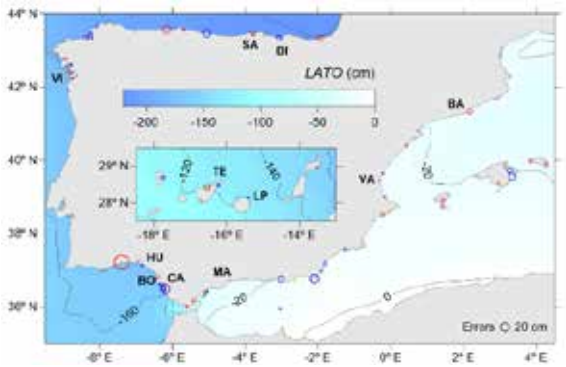


Fig. 1. Preliminary Spanish VRSH (orthometric height of LAT). Experimental differences proportional to blue (excess) and red (defect) circles.

As 'collateral benefits', the data analysis provided relevant advances in the knowledge on long-term (subinertial) sea-level dynamics within the study domains, with applications to research and operational works on global and regional climate effects. Three examples of that are the mean sea-level rising trends, the inter-annual variability of mean sea-level, and the annual and semi-annual contribution of the so-called 'radiational' tides in the Mediterranean area. The objective of this work is to describe these processes, deepening into their main causes and implications.

2. DATA AND METHODOLOGY

In order to evaluate plausible meteorological and climatological causes for the long-term sea-level variability within the study area, the effects of surface air-pressure p_{surf} (inverse-barometer), seawater temperature T (thermal expansion), and net water inflow through the Strait of Gibraltar Q_{in} (as indicative of the Mediterranean water budget) were taken into account as a first proxy (see, e.g., Woodworth et al. 2019). Rough estimations of these effects for sea-level variations can be respectively computed as $-\Delta p_{surf}/\rho g$, $\alpha D_{OML} \Delta SST$, and $(1/A)\int_t Q_{in} dt$, where ρ is the mean seawater density, g is the gravity acceleration, α is the mean thermal expansion coefficient of seawater (~$2 \cdot 10^{-4}$ K^{-1}), D_{OML} is the mixing-layer thickness, SST is sea-surface temperature, and A is the area of the domain considered (~$2.5 \cdot 10^6$ km^2 for the whole Mediterranean basin). Data sources are related as follows:

Sea-level: 1999-2017 hourly-averaged, 1/12-degree resolution IBIre fields of sea-level, surface currents,

and D_{OML} were complemented with long series from the tide-gauge stations BI, SA, VI, HU, BO, CA, MA, VA, BA, TE, and LP (see Figure 1).

Air-pressure: 2001-2020 daily-averaged, 1/4-degree time-spatial fields from the Copernicus Climate Change Service (C3S) ERA5 reanalysis product (ERA5re hereafter; cds.climate.copernicus.eu) were complemented with experimental series from the Spanish Agencia Estatal de Meteorología (AEMET; www.aemet.es) at the locations VI, BO, VA, and LP. Complementarily, 1999-2015 monthly-averaged series of North-Atlantic Oscillation index (NAO) were obtained from the 20CR Climate Indices of the USA National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA; psl.noaa.gov).

Sea-surface temperature: 2008-2021 daily-averaged, 1/16-degree fields of *SST* were obtained from the satellite-measured, level-4 NRT observation product of CMEMS for the Mediterranean Sea (SSTmed hereafter).

Atlantic inflow: 1992-2009 daily-averaged data of Q_{in} were obtained from the time-series reconstructed by Soto-Navarro et al. (2010), based upon measured, satellite, and reanalysis atmospheric data, as well as direct current-meter measurements.

All data series were de-trended, de-biased, moving-average-filtered, and submitted to harmonic and Fourier analyses to evaluate their variability at different time scales (see, e.g., Foreman and Henry 1989; Emery and Thompson 2001).

3. RESULTS

3.1. Decadal variability: sea-level rising trends

The de-trending of IBIre sea-level fields provided linear rising trends for the last two decades (Figure 2), which are always positive (ascending water) and about 3-4 mm/year near the shoreline. Comparison of IBIre results with available experimental long data series at 11 tide-gauge stations shows similar values and patterns. Error respect to observed values is (0.1 ± 1.0) mm/yr similar to previous studies based on satellite-altimetry and numerical models (see, e.g. Marcos et al. 2005, 2015; Meyssignac et al. 2011). Local effects due to *SST* and p_{surf} (0.5 – 1 mm/yr) are too weak to explain these trends. The most plausible reason is a general sea-level rising due to long-term climate effects such as global warming; the positive trend observed in the net Gibraltar inflow Q_{in} (77.3 m^3/yr) points to this conclusion.

The more heterogeneous fields of sea-level rising trends within the western Mediterranean – Alboran seas are related to the long-term, mesoscale cyclonic/anticyclonic gyres present there. They imply the strengthening of both types of gyre during the last 20 years. The geostrophic nature of these phenomena is shown by the trends of surface currents, which almost coincide with the expected fields derived directly from the geostrophic estimation of currents from the elevation gradients, with maximum differences below 2 mm/s/yr.

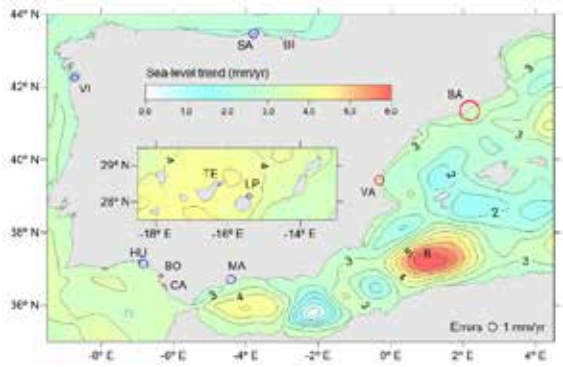


Fig. 2. IBIre sea-level rising trends. Experimental differences proportional to blue (excess) and red (defect) circles.

3.2. Inter-annual variability: changes on mean sea-level

During the elaboration of the VRSH, the fitness of IBIre mean-sea level with respect to experimental values was found to be considerably worse than that achieved for tidal ranges. Apart from model-resolution limitations, the main cause for that was the inter-annual variability of mean sea-level, which conditions the measured values because of the different times and lengths of the tide-gauge series. Examples of 1-year time-averaged series at stations VI, BO, VA, and LP are shown in Figure 3.

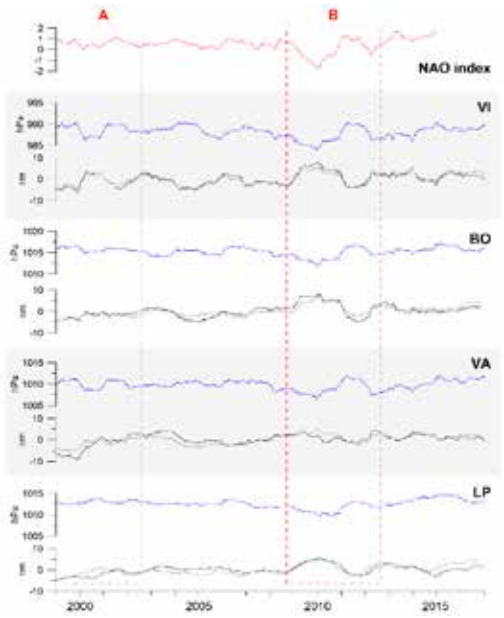


Fig. 3. Yearly-averaged series of observed (black) and IBIre (grey) sea-level, air-pressure (blue), and NAO index (red).

The main cause for this inter-annual variability is the inverse-barometer effect. Apart from local effects, large-scale episodes are present in many or even all stations, and they seem to be related with climate processes manifested through the NAO index. Soft NAO variations (A) affect mainly the northernmost stations VI and VA, while episodes of high NAO

variability (B) affect all stations, even LP in Canary Islands.

3.3. Annual and semi-annual variability: 'radiational' tides

The harmonic analysis of tide-gauge and IBIre sea-level time-series revealed the great contribution of the so-called 'radiational tides' (periodical effects of diurnal, semi-annual, and annual frequencies of no gravitational origin, but due to solar radiation-induced processes: air-pressure, water heating, wind-driven patterns, etc.; see Lisitzin 1974) within the Mediterranean area, which can overcome the gravitational tide in this micro-tidal environment. The field of amplitudes for the main 'radiational' annual constituent SA is shown in Figure 4a, reaching values of more than 10 cm. It is remarkable the relatively high spatial variability of this SA tidal chart, both in amplitudes and in phase-constants. Something similar can be said for the semi-annual SSA constituent, showing amplitudes between 1 and 3.5 cm. This spatial heterogeneity points to the importance of mesoscale processes in generating these 'radiational' tides within the study area. The rmse of IBIre amplitudes and phase lags with respect to the 11 experimental stations were, respectively, 1 cm and 18 days for SA, and 6 mm and 11 days for SSA. Both inverse-barometer and water thermal expansion have clear contributions to these annual and semi-annual sea-level variability. The relative intensity of the *SST* annual signal (Figure 4b) increases eastwards along the Iberian shore, while for p_{surf} the pattern is the opposite (Figure 4c). In contrast, the semi-annual signal shows less spatial variability.

However, neither thermal expansion of seawater nor inverse-barometer effect seem to be enough to explain the intensity and spatial patterns of the SA tide, since their annual contribution should be about 2 and 2.5 cm, respectively. Indeed, the spatial heterogeneity of SA tide is not present within the corresponding fields for the annual signal of p_{surf} and *SST*. The remaining contribution, until the observed 7-10 cm amplitudes, is plausibly related to the Mediterranean Sea water budget, manifested in the behaviour of the net water inflow through the Strait of Gibraltar. The annual amplitude of Q_{in} is about 0.04 Sv (Figure 5), which imply sea-level variations higher than 8 cm. The consequences for the hydrodynamics of the Atlantic jet could explain the mentioned time-spatial variability of the SA tide.

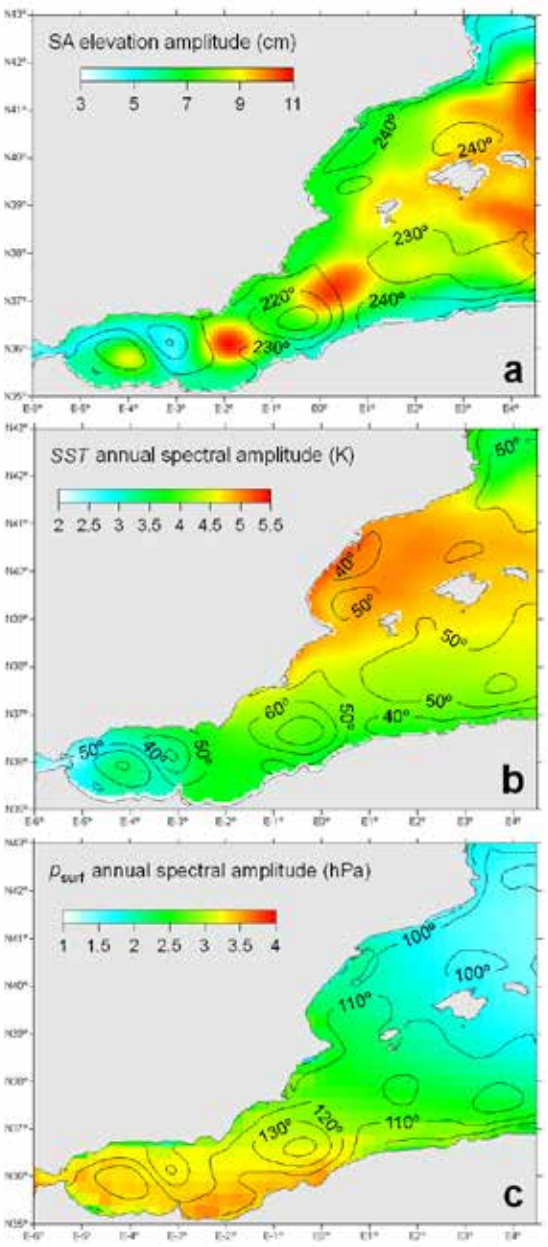


Fig. 4. a: IBIre SA amplitude (color map) and phase-constant (contour map, in Greenwich degrees). b: Spectral Fourier annual amplitude (color map) and phase-lag with respect to SA tide (contour map) for SSTmed SST. c: The same as in b but for ERA5re p_{surf}.

The SSA tide, with amplitudes about 1.5-2.5 cm, could be explained at a great extent by the semi-annual component of p_{surf} and *SST*, with respective related amplitudes about 1.5 cm and 0.5-1 cm. In this case, the semi-annual component of Q_{in} is much weaker, so Mediterranean water budget does not seem to contribute to the SSA tide at the extent it does for SA within this region.

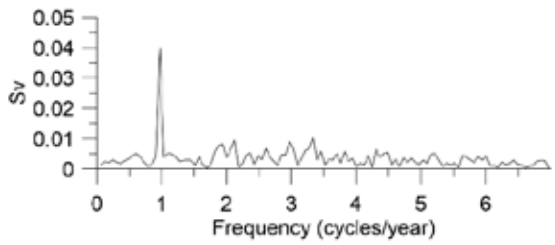


Fig. 5. Fourier spectrum for Q_{in} amplitude.

4. CONCLUDING REMARKS

The model-reanalysis data of the CMEMS-IBIre product have revealed their capability in reproducing the time-spatial variability of sea-level at different time scales. González et al. (2021) showed the good fitness of IBIre data to observed tidal variations of sea-level, and constituted the basis of the Spanish VRSH. In this study, the ability of IBIre data in reproducing long-term sea-level changes is shown, and allowed us to deepen in our understanding of the involved meteorological and climate processes. Air-pressure, seawater temperature, and Mediterranean water budget were found to be the main causes for the observed sea-level rising trends, inter-annual variability, and annual/semi-annual 'radiational' tides.

However, this study should be completed with reliable data regarding the different terms of Mediterranean water budget (evaporation, precipitation, river discharges), also considering regional/local processes such as deep-water formation and dynamics, and wind-driven circulation. A deeper study on the inter-dependence and phase-lags between the chosen variables should be conducted as well, by means, e.g., of cross-spectral and factorial analysis. These tasks imply difficult challenges to deal with, but the promising results obtained here with relatively simple proxies make them worth to be faced.

REFERENCES

Aznar, R., Sotillo, M.G., Cailleau, S., Lorente, P., Levier, B., Amo-Baladrón, A., Reffray, G. and Álvarez-Fanjul, E., 2016. Strengths and weaknesses of the CMEMS forecasted and reanalyzed solutions for the Iberia-Biscay-Ireland (IBI) waters. *J. Marine Syst.* 159, pp. 1–14.

Emery, W.J. and Thompson, R.E., 2001. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier Science, 658 pp.

Foreman, M.G.G. and Henry, R.F., 1989. The harmonic analysis of tidal model time series. *Adv. Water Resour.* 12, pp. 109-120.

González, C.J., Torres, J.A., Bernárdez, P. and Ramos R.J., 2021. Validation and application of model/reanalysis sea-level data to the establishment of the Reference Hydrographic Surface in Spanish waters. *Journal of Operational Oceanography*, DOI: 10.1080/1755876X.2021.1902681.

Lisitzin, E., 1974. *Sea-level changes*. Elsevier Oceanography Series 8. ISBN: 0-444-41157-7.

Marcos, M., Gomis, D., Monserrat, S., Álvarez-Fanjul, E., Pérez, B. and García-Lafuente, J., 2005. Consistency of long sea-level time series in the northern coast of Spain. *J. Geophys. Res.* 110, C03008.

Marcos, M., Pascual, A. and Pujol, I., 2015. Improved satellite altimeter mapped sea level anomalies in the Mediterranean Sea: A comparison with tide gauges. *Adv. Space Res.* 56, pp. 596–604.

Meyssignac, B., Calafat, F.M., Somot, S., Rupolo, V., Stocchi, P., Llovel, W. and Cazenave, A., 2011. Two-dimensional reconstruction of the Mediterranean sea level over 1970-2006 from tide gage data and regional ocean circulation model outputs. *Global Planet. Change* 77, pp. 49–61.

Sotillo, M.G., Cailleau, S., Lorente, P., Levier, B., Aznar, R., Reffray, G., Amo-Baladrón, A., Chanut, J., Benkiran, B. and Alvarez-Fanjul, E., 2015. The MyOcean IBI Ocean Forecast and reanalysis systems: operational products and roadmap to the future Copernicus service. *J. Oper. Oceanogr.* 8(1), pp. 63–79.

Soto-Navarro, J., Criado-Aldeanueva, F., García-Lafuente, J. and Sánchez-Román, A., 2010. Estimation of the Atlantic inflow through the Strait of Gibraltar from climatological and in situ data. *Journal of Geophysical Research* 115, C10023.

Woodworth, P.L., Melet, A., Marcos, M., Ray, R.D., Wöppelmann, G., Sayaki, Y.N., Cirano, M., Hibbert, A., Huthnance, J.M., Monserrat, S. and Merrifield, M.A., 2019. Forcing factors affecting sea level changes at the coast. *Surv. Geophys.* 40, pp. 1351-1397.

Batimetria Derivada de Satélite: uma nova ferramenta para produção de cartografia náutica

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

(1) LS – Engenharia Geográfica, UAlg TEC Campus, 8005-139 Faro. claudio.sousa@lsengenharia.pt

Resumo: A mais recente revisão da Publicação S-44, que define as normas e especificações aplicadas aos levantamentos hidrográficos, inclui a batimetria derivada de satélite no grupo de técnicas para a realização de medições de profundidades. A LS-Engenharia Geográfica tem desenvolvido metodologias inovadoras para a estimação de batimetria a partir de imagens multiespectrais, utilizando técnicas de inversão de modelos bio-ópticos oceânicos, uma solução para aplicação global e que dispensa o recurso a profundidades *in-situ*. Um dos objectivos finais é a integração desses dados em cartografia náutica, considerando-se as estimativas de profundidades e, principalmente as estimativas de erro, suficientemente precisas e aceitáveis para a navegação marítima, e em harmonia com os padrões da Organização Hidrográfica Internacional. Neste artigo serão apresentados os resultados da utilização de imagens Sentinel-2 MSI para extracção de batimetria e identificação de zonas de risco à navegação no Porto de Inhambane (Moçambique).

Palavras-chave: batimetria, cartografia náutica, detecção remota, modelos bio-ópticos, navegação

1. INTRODUÇÃO

Não será correcto afirmar que todas as zonas costeiras mundiais têm uma cobertura cartográfica precisa e actual e a Organização Hidrográfica Internacional (OHI) procura desde há longo tempo, um método economicamente acessível para o conseguir, especialmente nos países com menos recursos. As técnicas para realização de levantamentos hidrográficos evoluíram ao longo da história, desde a utilização do fio-de-prumo e sextante até ao posicionamento por satélite combinado com a utilização de sondadores acústicos. Entretanto, com o advento de sensores remotos de observação terrestre, a comunidade científica tem apontado para outras tecnologias mais eficazes e orientadas para uma cobertura global. É certo que as técnicas tradicionais permitem obter dados batimétricos de elevada resolução e precisão, mas os custos operacionais e os processos de trabalho demorados limitam a sua utilização a áreas de navegação comercial ou a zonas onde é exigida uma busca de objectos e cobertura total do fundo, tornando-as economicamente inadequadas para grandes áreas. Além de tudo isto, um dos maiores desafios deste século é alcançar o estado de neutralidade em carbono, e no futuro próximo, a utilização de meios que impliquem o embarque de pessoas e equipamentos deverá ficar reservada só para algumas prioridades ou situações particulares. As técnicas para derivação de batimetria a partir de imagens de satélite (inglês: SDB - *Satellite Derived Bathymetry*) não são uma novidade e têm sido utilizadas desde cerca de 1970, podendo ser implementadas através de métodos analíticos ou empíricos, explorando estes, as relações estatísticas entre os valores do píxel da imagem e dados de profundidades *in-situ*. A abordagem analítica – mais recente – não necessita de dados de profundidades conhecidas e é mais adaptável a variações do tipo de fundo. A publicação S-67 define cinco categorias para avaliação da qualidade de dados batimétricos; são as Categorias de Zonas de Confiança de Dados (inglês: CATZOC - *Category of Zones of Confidence*), um atributo incluído na classe de objectos S-67, baseado numa combinação de incertezas horizontal e vertical, e ainda o tipo de cobertura do fundo. Com excepção da categoria em que está prevista a busca total do fundo (A), a SDB poderá atender aos critérios mínimos para enquadramento em todas as outras (B, C e D), proporcionando uma cobertura contínua e com especial interesse para áreas geográficas extensas e com grande dinâmica sedimentar. A cobertura cartográfica precisa e consistente de ambientes costeiros tem sido sempre um desafio – mesmo com recursos suficientes – mas as informações obtidas são muitas vezes dispersas no tempo e no espaço, com algumas áreas sendo sujeitas a sondagens menos intensivas do que outras, como é o caso de zonas rasas e/ou de difícil acesso às embarcações. A adopção de técnicas SDB deverá possibilitar a produção de uma nova geração de cartas náuticas, e a actualização daquelas baseadas em levantamentos muito antigos e com recurso a métodos obsoletos.

2. CASO DE ESTUDO

Na longa linha de costa de Moçambique destacam-se algumas importantes baías que a tornam um excelente destino turístico, algumas delas com elevado interesse estratégico, devido à sua localização. A Baía de Inhambane situa-se na Bacia Austral, zona Sul, entre a capital do país e a segunda maior cidade, Beira. Esta zona costeira é caracterizada por dunas recentes e extensões descontínuas de praias arenosas,

cujo transporte de sedimentos, por força do regime de correntes e marés, confere à barra natural um carácter dinâmico, resultando em ondulação que quebra continuamente e torna a aproximação da costa perigosa (Figura 1).



Figura 1. Imagem multiespectral (composição RGB) da Baía de Inhambane, obtida pelo sensor Sentinel-2 MSI em 11/09/2021.

O porto interior dista cerca de 14 milhas náuticas da barra de entrada, e apesar de classificado como secundário e de âmbito local, é fundamental para o transporte de pessoas e mercadorias entre as cidades de Inhambane e Maxixe, constituindo o principal acesso portuário da região. No contexto de um programa para melhoria e aumento das capacidades de transporte de passageiros e carga, o governo de Moçambique considerou o reposicionamento do porto e da província de Inhambane no mapa de navegação marítima da costa moçambicana. Segundo o Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação (INAHINA), o último levantamento hidrográfico realizado em Março de 2020 previa a obtenção de dados para a compilação de uma nova Carta Náutica (CN), mas devido a limitações diversas não foi possível cobrir toda a área de interesse. Actualmente, esta província é servida pela CN 493 - Porto e Barra de Inhambane, à escala 1:50000, cuja última edição é do ano 1965.

3. METODOLOGIA

3.1. Pré-processamento de imagens de satélite

A Bacia de Inhambane está sujeita à influência das marés, com forte variabilidade nas velocidades das correntes nos períodos de enchente e vazante, e pode apresentar grande turbidez, que se caracteriza pela alta concentração de sedimentos em suspensão, o que se deve não só ao escoamento de sistemas fluviais próximos mas também às propriedades intrínsecas da sua água oceânica. Estas características impõem uma série de limitações e constituem um desafio à aplicação de metodologias SDB, e por isso, a criteriosa escolha de imagens é determinante na qualidade dos modelos derivados, havendo a ter em conta a transparência, presença de nuvens e o brilho solar como principais factores. O par de satélites Sentinel-2 do programa espacial europeu Copernicus, está equipado com sensores MSI (*Multispectral Instrument*) que permitem a captação de imagens em 13 bandas espectrais com uma resolução espacial que varia entre os 10 e os 60 metros, cobrindo a maioria das áreas costeiras mundiais num período de revisita de 5-7 dias. Neste estudo foram utilizadas 5 bandas multiespectrais (1, 2, 3, 4 e banda 8) captadas sobre a região de Inhambane em 11 de Setembro de 2020, e abrangendo comprimentos de onda no intervalo 443 - 842 nm. Quando o objectivo da utilização de dados de detecção remota é deduzir a batimetria, será conveniente fazer uma delimitação das bacias hidrográficas com interesse para a área de estudo e neste caso, estimou-se um valor de reflectância com base na análise do histograma da banda do infravermelho próximo (banda 8), que serviu como limite para separação terra/água. O brilho solar é um dos factores ambientais a ter em conta quando se pretendem explorar dados em ambiente marinho, e apesar das ferramentas existentes, a selecção prévia de imagens com brilho mínimo parece ser a melhor solução uma vez que as correcções não são perfeitas e acabam por introduzir algum ruído. Neste caso, esse fenómeno foi atenuado com recurso ao algoritmo de Hedley *et al.,* (2005). A derivação de batimetria através de técnicas de inversão exige valores de reflectância *Bottom-Of-Atmosphere*, pelo que foi aplicada uma correcção atmosférica aos produtos nível-1C, recorrendo a ferramentas de arquitectura *open-source* (SNAP-Sen2Cor).

3.2. Inversão de modelos bio-ópticos para derivação de batimetria

As técnicas de inversão com base na teoria da transferência de radiação são uma das metodologias SDB mais recentes para aplicação em zonas rasas, não requerem dados *in-situ,* nem qualquer mobilização de pessoas ou equipamentos, e a profundidade máxima alcançada é semelhante à profundidade de Secchi, em zonas de água límpida (Hedley *et al*., 2015). Esta abordagem é baseada no princípio de que as transmitâncias de comprimentos de onda da faixa do visível na água do mar, são funções de uma equação geral dependente das propriedades ópticas intrínsecas à água do mar (Lee *et al.*, 1998). A descrição das propriedades ópticas do oceano em função da actividade biológica dentro desse meio, assim como de substâncias, tais como sedimentos e matéria orgânica dissolvida colorida, pode designar-se como modelo bio-óptico. Através da aplicação de técnicas de inversão, esses modelos descritivos – cujos componentes podem ser obtidos a partir de bibliotecas espectrais – permitem prever o comportamento/propagação da luz ao longo de uma determinada coluna de água. Os diferentes componentes ópticos activos existentes no meio aquático afectam a reflectância espectral, de forma distinta, e a utilização de várias bandas com suficiente capacidade de penetração permite o desdobramento dos sinais sobrepostos, e consequentemente, estimar

o seu contributo. O método utilizado neste trabalho é baseado na abordagem de Lee *at al*., (1998), e pode ser traduzido pela equação:

$$\mathrm{Rrs}(\lambda \mathrm{i}) \approx f\,(P, G, X, H, R(\lambda), \lambda)$$

em que a reflectância à superfície Rrs(λ) é determinada por uma função *f*, dependente de *P* (quantidade de fitoplâncton), *G* (matéria orgânica dissolvida colorida), *X* (retro-dispersão), *H* (profundidade) e reflectância do fundo *R*(λ). O intervalo de valores dos parâmetros a utilizar é escolhido a partir de bibliotecas de medições *in situ*, que contêm informação sobre propriedades ópticas e diferentes tipos de fundo. Este algoritmo permite estimar a altura da coluna de água, que poderá ser reduzida a um determinado referencial vertical considerando-se o momento de aquisição das imagens e modelos de previsão de maré globais ou registos de estações maregráficas locais. No processamento foram utilizadas as primeiras 4 bandas disponíveis, com uma pré-reamostragem dos píxeis, no caso da banda 1, de 60 para 10 metros.

4. RESULTADOS

Provavelmente, a maior vantagem do uso de imagens de satélite de boa qualidade – no presente contexto – será a identificação visual das estruturas do fundo. No modelo batimétrico resultante, com resolução espacial de 10 metros (Figura 2), é possível localizar correctamente as zonas mais rasas e as que, por esse mesmo motivo, podem constituir um perigo para a navegação.

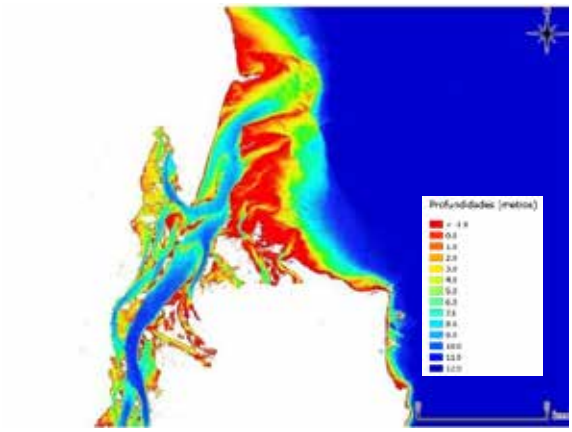


Figura. 2. Modelo SDB da Bacia de Inhambane.

Quando comparado com a CN 493, as diferenças são evidentes, particularmente na barra de entrada (Figura 3).

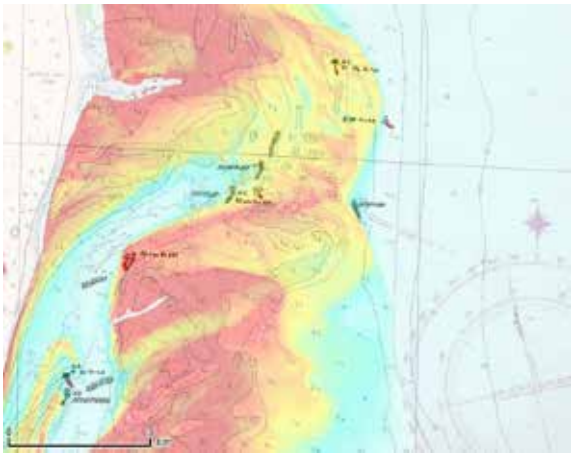


Figura. 3. Modelo SDB sobreposto à CN 493. A cor vermelha assinala baixios em contraste com as isobatimétricas da carta.

Quanto à qualidade da informação batimétrica obtida, e no que respeita à componente horizontal, a geolocalização dos produtos Sentinel-2 nível 1-C é actualmente melhor que 7,1 metros, com um nível de confiança de 95%; haverá contudo que considerar a dimensão do píxel (10 metros). O modelo gerado foi reduzido ao Zero Hidrográfico local (1,93 metros abaixo do Nível Médio do Mar), usando-se a altura de maré registada pelo INAHINA, à hora da captação das imagens. Chegou a considerar-se a comparação com dados obtidos no último levantamento hidrográfico realizado nesta zona, no entanto, existe consciência da distância temporal entre esses dados e as imagens que, quando utilizadas em conjunto com dados de profundidades coetâneos, podem proporcionar uma maior confiança nos modelos obtidos. E assim, para avaliação da precisão vertical, foi usado um conjunto de dados LiDAR do satélite ICESat-2 (Setembro de 2021 – Figura 3) corrigidos do efeito da refracção; uma fonte de informação com uso crescente em aplicações de batimetria (Hedley *et al*., 2021).



Figura 4. ICESat-2 – posições dos feixes luminosos.

O instrumento ATLAS transportado pelo ICESat-2 é um laser-altímetro que emite feixes de luz na banda do verde (532 nm). O sinal reflectido da superfície da água permite medir a altura do nível do mar,

globalmente. Apesar de não ter sido desenvolvido especificamente para batimetria, sob condições favoráveis, o fundo também pode ser detectado até profundidades de 40 metros.
Através de uma análise estatística, foram calculadas as diferenças entre os conjuntos de profundidades, obtendo-se um erro médio quadrático de 0,78 metros (Gráfico 1).

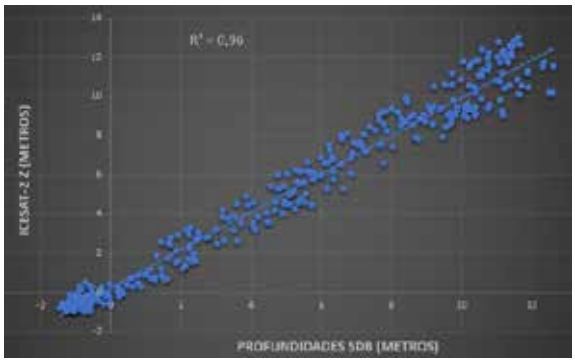


Gráfico. 1. Correlação de dados (SDB vs. ICESat-2).

O coeficiente de determinação obtido é um indicador da boa qualidade do modelo de regressão, não se tendo verificado desvios superiores a 1,20 metros até aos 10 metros (12% da profundidade). No entanto, nas zonas mais interiores do canal é de esperar um aumento desta percentagem, devido a níveis de turbidez mais elevados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A publicação S-67 definiu graus de confiança a adoptar, relativamente à precisão da informação batimétrica contida nas Cartas Electrónicas de Navegação, para uso em zonas costeiras e internacionais. Ela refere ainda que, apesar das indicações quanto a equipamentos a utilizar para determinação da posição e profundidade, os navegantes deverão considerar principalmente o valor CATZOC e outros atributos de qualidade específicos, em detrimento dos meios utilizados para aquele fim. Os resultados obtidos neste trabalho apontam para uma integração na categoria B, que impõe uma precisão horizontal melhor ou igual a 20 metros e uma precisão vertical melhor que 1 metro + 2% da profundidade. Há que considerar a possibilidade de degradação da precisão vertical nas zonas mais interiores, mas ainda assim, a qualidade da informação será suficiente para a correcta identificação de zonas rasas ou perigos naturais.
O uso de ferramentas SDB faz parte de um processo cuja "fórmula" admite um conjunto de variáveis fornecidas por dados de satélite, estando o seu resultado directamente dependente da interpretação de profissionais experientes nos domínios da física, oceanografia e hidrografia. À semelhança de outras tecnologias, saber como e onde deve ou não ser utilizada, é determinante para a obtenção de resultados de confiança, de forma a constituir uma solução fiável para a produção de informação batimétrica.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao INAHINA particularmente ao Ricardo Machave – a cedência dos dados utilizados neste trabalho.[1]

REFERÊNCIAS

Ashphaq, M., Srivastava, P. e Mitra, D. (2021). Review of near-sho re satellite derived bathymetry: Classification and account of five decades of coastal bathymetry research. *Journal of Ocean Engineering and Science*, (6), 340-359.

ESA (2022). L1C Data Quality Report. Disponível em: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_L1C_Data_Quality_Report

Hedley, J., Ochoa, R., Enríquez, S. (2021). Seagrass Depth Distribution Mirrors Coastal Development in the Mexican Caribbean – An Automated Analysis of 800 Satellite Images. Frontiers in Marine Science. Vol. 8 – 733169.

Hedley, J., Russell, B., Randolph, K. e Dierssen, H. (2015). A physics-based method for the remote sensing of seagrasses. *Remote Sensing of Environment*, (174): 134–147.

IHO (2020). S-67 – Mariners' Guide to Accuracy of Depth Information in Electronic Navigational Charts (Edition 1.0.0). Monaco.

Lee, Z. P., Carder, K. L., Mobley, C. D., Steward, R. G., e Patch, J. S. (1998). Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 1. A semianalytical model. *Applied Optics*, 37(27):6329–6338.

Morel, A. (2001). Bio-optical models. Disponível em: https://curry.eas.gatech.edu/Courses/6140/ency/Chapter11/Ency_Oceans/Bio-optical_Models.pdf

Hoguane, A. (2007). Perfil Diagnóstico da Zona Costeira de Moçambique. *Revista de Gestão Costeira Integrada*. Disponível em: https://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci7_8_Hoguane.pdf

Homepage oficial de ICESat-2, website: https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/. Acesso em 02/05/2022.

[1] Este documento não utiliza o novo acordo ortográfico.

Resposta acústica de artes de pesca para captura de lula e ocultação à sondagem por golfinhos

M. Barreto (1), M. Gatta (1, 2, 3), V. Lobo (1, 2, 4)

(1) Escola Naval, miguelbarreto00@gmail.com

(2) CINAV, Centro de Investigação Naval.

(3) CFCUL, Universidade de Lisboa.

(4) NOVA IMS.

Resumo: A depredação por golfinhos das lulas ferradas nas toneiras da frota de pesca artesanal Micaelense, nos Açores, constitui um problema sócio-económico e de conservação marinha. Na hipótese da resposta das toneiras à sondagem acústica (ecolocalização) por parte dos golfinhos ser significativa, estas seriam um elemento auxiliar que lhes facilitaria a detecção e identificação. Uma mudança nas artes de pesca podia assim ajudar a minimizar os prejuizos causados. Para compreender a detectabilidade através de acústica submarina, caracterizámos a impedância dos materiais e a resposta das toneiras a sinais sonoros de banda curta percorrendo o intervalo espectral dos cliques de golfinhos. Dos ensaios realizados em configuração bi-estática no tanque anecóico, resultam sonogramas, curvas de resposta em frequência e valores quantitativos (*target strength*) que nos permitem hierarquizar reflectividades e distâncias de detecção. Permitem também comparar comportamento de ecos e sugerir medidas para atenuar a reflectividade (aumentando a furtividade), originando recomendações aos pescadores.

Palavras-chave:, acústica submarina, detecção acústica, ecolocalização, furtividade, *Target Strength.*

1. INTRODUÇÃO

As frotas de pesca artesanal para a captura de lula na ilha de são Miguel – Açores, reportam com regularidade, a depredação por golfinhos durante a fase da recolha para bordo, das lulas já ferradas nas artes de pesca (toneiras), no que é um problema ambiental, como também sócio-económico pela razão de que acresce os factores de incerteza ao retorno a obter por cada saída de mar e acentuar a instabilidade financeira das famílias que dependem da actividade (Figura. 1). Este caso foi já alvo de estudos anteriores (Cruz *et al*., 2014) onde se testaram também diferentes abordagens na procura de reduzir o impacto do fenómeno mas que contudo, carece ainda que se encontrem soluções realmente funcionais.

a)  b) 

Figura. 1. a) lula ferrada na toneira ; b) vestigios de depredação.

Problemas de interacção de cetáceos nas pescas são aliás, um fenómeno com expressão à escala global e comum em diversas pescarias, sendo uma das principais ameaças que se menciona como prioritário combater para a salvaguarda e conservação da vida selvagem nos oceanos. Os golfinhos são como se sabe, dotados de um sistema de sonar biológico (ecolocalização) que lhes permite a detecção e discriminação de alvos distantes. Como resultado de embarques realizados para se conhecer a dinâmica da pesca e observar as interacções tendo por objectivo identificar pontos de intervenção, surgiu a hipótese de se em comparação com as lulas, presas alimentares com fraca reflectividade acústica que os golfinhos buscam em profundidade, possam as artes de pesca usadas por esta frota e pelas suas características de construção, proporcionar uma resposta mais forte aos cliques emitidos pelos animais e com isso servir como elemento auxiliar que os beneficia na detecção e contribuí em estender a janela de tempo (e distância) útil para a execução dos ataques. Será então provável que as toneiras constituam para o cetáceo, um elemento de interesse a prioritizar na busca activa em detrimento dos cefalópodes e em parte contrariando a finalidade a que se destinam ao potenciar o grau de vulnerabilidade e prejuízos do pescador, podendo a escolha de determinadas toneiras, mais prejudicar do que ajudar. Será então oportuno avaliar a resposta destas à ecolocalização, e também medidas para as ocultar. Este é assim um problema de busca e detecção (activa) de pequenos objectos em meio submerso, tarefa também comum à hidrografia e que remete para os fundamentos da acústica submarina. Sobre o aparelho de pesca, este compõem-se de duas toneiras (pequenos corpos com aspecto a mimetizar um peixe) suspensas por uma linha e incrustradas na

extremidade oposta com coroas de alfinetes para a captura da lula, que se complementam e não se podem substituir mutuamente, tendo uma delas a função prioritária de lastrar o conjunto que o operador faz agitar rente aos fundos e recolhe manualmente de profundidades na ordem dos 140-300 m. A saber ainda, que o critério fundamental de que depende a reflexão acústica e produção de ecos, é o contraste de impedâncias acústicas entre os materiais que constituem: o meio (Z_1) onde está imerso o alvo (na água) por ser onde se propaga o sinal incidente, e os materiais de que é construído o alvo reflector (Z_2), neste caso as toneiras. A fim de se avaliar e fundamentar a discussão da sua detectabilidade à sondagem dos cetáceos que permita contribuir com conhecimento e recomendações para os pescadores, houve que: 1) estudar as características de construção e materiais constituintes dos diferentes tipos de toneiras usadas, e 2) testar experimentalmente a reflectividade destas a sinais sonoros nas frequências abrangidas pelos cliques emitidos por golfinhos e que se descreve com o parâmetro quantitativo do *Target Strength* (*TS*), em décibeis (dB). A impedância acústica (Z) de qualquer material, será calculável se lhe forem conhecidas a densidade (ρ) e velocidade do som (c), Equação 1 (Au e Hastings, 2010). O contraste de impedâncias pode ser quantificado por estimativa do parâmetro do Coeficiente de Reflexão (C_r), Equação 2 (Lurton, 2002).

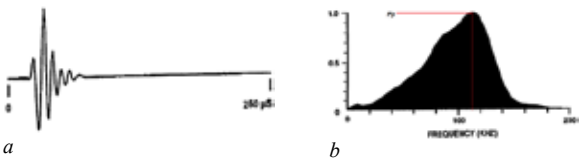
$$Z = c.\rho \qquad 1$$

$$C_r = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}\right) \qquad 2$$

Já o parâmetro do *TS*, consiste na razão entre os valores lidos da energia reflectida (E_r) sobre a incidente (E_i), Equação 3 (Lurton, 2002).

$$TS = 10\log_{10}\left(\frac{E_r}{E_i}\right) \qquad 3$$

Enquanto plataforma de sondagem, podemos considerar os golfinhos como um sistema mono-estático que emite sinais de banda larga (Figura. 2), com energía entre, cerca dos 15 aos quase 200 KHz e no caso dos delfinídeos, de muito curta duração ($\tau_{cliques}$<100 µs).



a *b*

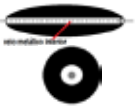
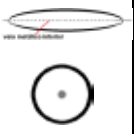
Figura. 2. Caracteristicas de clique de golfinho. a) no dominío do tempo; b) espectrograma. Adaptado de Au e Hastings, 2010.

Uma estratégia para minimizar o sucesso dos golfinhos na depredação, poderá ser a ocultação das toneiras à detecção, isto é tornando-as furtivas e que implica discutir as diferentes metodologías. A saber: a) favorecer o casamento de impedâncias; b) explorar o desvio do eco coerente para direcção diferente da origem; c) absorção da energia acústica incidente e d) aplicação de *Cloaks* acústicos e metamateriais.

2. METODOLOGIA E MEIOS

Depois de recolhidos e catalogados com código alfa-numérico consoante a tipologia e função prioritária no aparelho - para Captura (C) ou para Lastro (L), foram observados nos exemplares que se seleccionaram como os representativos da diversidade de toneiras usadas pela frota (Tabela. i), as características de construção e materiais constituintes, tendo para isso consultado também uma especialista na área dos polímeros.

Tabela. i. Toneiras seleccionadas para análise e pormenores relevantes, para as compreender como alvos à detecção acústica.

Função	Exemplar		Materiais	Perfil transversal e constituição interior
Lastro	C02		chumbo	
	C05			
Captura	W38 (japonesas)		poliestireno gasoso (duas bolsas de ar interiores) chumbo	
	X01 (fuso)		polietileno aço (?) (veio interior metálico)	
	U01 (fuso)		borracha aço (?) (veio interior metálico) água (no interior)	
	Y01		Polietileno borracha	

Afim de se poder discutir a detectabilidade destes objectos enquanto alvos de busca pelos cetáceos, avaliaram-se as reflectividades dos referidos exemplares explorando em paralelo, duas abordagens diferentes, a saber: a) a determinação do valor teórico do C_r dos diversos materiais usados na sua construção, e b) medições experimentais com sinais sonoros para conhecer o valor do TS.

1.1. Estima do C_r dos materiais constituintes e respectivos contrastes de impedância acústica com a água

Seguindo as opiniões da especialista em polímeros (que se baseou numa identificação apenas táctil e visual, justificando-se assim alguma cautela nas considerações ao trabalho), procedeu-se depois à consulta de tabelas de características dos materiais (Blattenberger, s.d.) para se conhecer as ρ e c dos vários materiais identificados nas toneiras em análise e derivar valores de impedância acústica. Assim se puderam depois estimar valores do parâmetro C_r considerando-as na condição de submersas na água, e por fim proceder também à hierarquização de reflectividades das toneiras consoante os materiais que as constituem.

1.2. Ensaios de acústica submarina para avaliação do TS

Realizaram-se nos tanques de acústica submarina do Arsenal do Alfeite, S.A, em condições anecoicas, numa configuração experimental bi-estática pela razão dos transdutores disponíveis para as frequências desejadas serem omni-direccionais, ensaios laboratoriais para caracterizar a resposta acústica das toneiras em ambiente submerso - nomeadamente do parâmetro do *Target Strength* - à incidência transversal de sinais sonoros de banda curta (sinosoides), percorrendo em passos de 10 KHz o intervalo espectral dos 40 aos 160 KHz por ser o especialmente relevante nos cliques de banda larga dos golfinhos (Figura. 3).

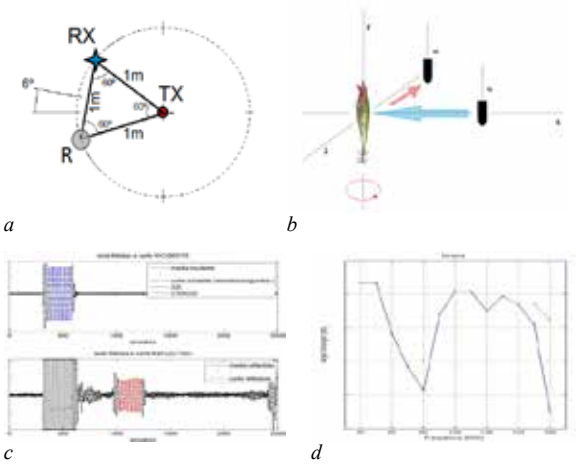


Figura. 3. a) geometria experimental bi-estática dos ensaios com posicionamento triângular entre o alvo e transdutores TX e RX a 1 m de distância; b) pormenor da orientação dos alvos em que se testaram as reflectividades - "incidência no plano transversal"; c) pormenor dos sinais e porções que se seleccionaram para análise entre os transitórios do Incidente (azul) e Eco Reflectido (vermelho); d) exemplo de curva de resposta em frequência compilada para uma das toneiras testadas - nas abcissas a frequência, e às ordenadas correspondem os valores de Target Strength (em dB).

A considerar na análise aos dados obtidos, de ser desconhecida e desprovida de controlo a orientação azimutal do alvo durante os ensaios e que os sinais emitidos nos testes, com duração na ordem dos 200 µs, excediam largamente a duração dos cliques. Só foram integradas para análise, porções dos sinais Incidente e Reflectido contidas entre os transitórios nos seus extremos, e igual quantidade de amostras (i.e., duração temporal) para ambos (τ_i=τ_{eco}). Obtiveram-se curvas de resposta em frequência para o intervalo referido a partir dos quais se calcularam depois para cada toneira, um valor de TS médio por forma a que se as possam hierarquizar da mais reflectiva à mais discreta, à detecção activa. Há a referir dos testes ao exemplar U01, que se realizaram com o seu interior preenchido com água e esvaziado de conteúdo gasoso, equivalendo à condição esperada no seu uso em profundidade.

3. RESULTADOS

São item comum a quaisquer toneiras, as coroas de alfinetes metálicas, que na dúvida consideramos serem de aço. Na Tabela. ii identificam-se para os vários exemplares analisados, os materiais que julgamos serem os usados na construção de cada toneira (desprezando-se o aço para a coroa de alfinetes, mas não de outras componentes também metálicas), as caraterísticas mecânicas e os valores de Z e C_r calculados para a condição de imersos em água. Toneiras "*de lastro*", são construídas únicamente em chumbo e de contituição interior maciça. Nas "de *captura*", destaca-se o modelo do exemplar W38 que se constitui dos materiais com os valores do C_r mais elevados. O facto de para o "ar" ter valor negativo é apenas indicação que o eco sofre inversão de fase, porém em termos absolutos é o que tem o C_r mais elevado. Já a U01 é construída com os materiais de C_r inferiores e por isso os menos reflectivos.

Tabela. ii. Descrição dos materiais de fabrico das toneiras; as características mecânicas e acústicas (Blattenberger, s.d.).

tipo toneira	ID toneira	material	densidade kg m^{3}	Velocidade som longitudinal ms^{-1}	Z Kg m^{-2} s^{-1}	Coeficiente de Reflexão com a água
		água	1000	1500	1500000	-
lastro	C05	chumbo	11400	2000	22800000	0,88
	C02					
captura	W38	poliestireno	1060	2350	2491000	0,25
		ar	1,293	340	439,62	-0,99
		chumbo	11400	2000	22800000	0,88
	X01	polietileno	900	1950	1755000	0,08
		aço	7900	5800	45820000	0,94
	Y01	polietileno	900	1950	1755000	0,08
		borracha	1000	1600	1600000	0,03
	U01	borracha	1000	1600	1600000	0,03
		aço	7900	5800	45820000	0,94

Ordenaram-se por ordem decrescente, os resultados de $TS_{médio}$ estimados para cada toneira com base nos TS obtidos experimentalmente para as várias frequências (Tabela. iii) e que aqui se apresentam convertidos para um valor relativo (a diferença à toneira de maior $TS_{médio}$), não sendo estes os valores absolutos. A toneira mais reflectiva face às restantes, será a W38 (das "*de captura*") que apenas excede

ligeiramente as "*de lastro*" (C02 e C05) e que se destaca significativamente das restantes da mesma categoria, diferindo o $TS_{médio}$ ao da menos reflectiva (U01) em 15 dB. Pela inclusão também nesta tabela, dos materiais e respectivos C_r antes estimados, constatamos que a reflectividade das toneiras observada experimentalmente parece acompanhar a esperada considerando os materiais de que são construídas e indicador de que (ainda desprezando as dimensões, geometrias e quantidades relativas dos materiais em cada exemplar, a par de como já referido, também o aço nas coroas), a reflectividade cumpre os pressupostos teóricos da física acústica.

Tabela. iii. Ordenação de reflectividades (valores TS) medidos experimentalmente, os materiais e os contrastes de impedância.

hierarquização de	toneira	função	ordenação das diferenças relativas dos $TS_{médio}$ (dB)	materiais de constituição e coeficientes de reflexão na água (Cr)		
1º	W38	C	**0**	poliestireno (0,25)	ar |0,99|	chumbo (0,88)
2º	C02 C05	L	**-2**	chumbo (0,88)		
3º	X01	C	**- 3**	polietileno (0,08)	aço (0,94)	
4º	Y01	C	**-8**	polietileno (0,08)	borracha (0,03)	
5º	U01	C	**-15**	borracha (0,03)	aço (0,94)	

4. DISCUSSÃO E RECOMENDAÇÕES

Deste trabalho resulta: A) informação dos materiais das toneiras e contraste de impedâncias com a água, B) sonogramas que permitem observar o comportamento do eco das toneiras no tempo e compreender os seus processos de formação, C) curvas de resposta em frequência e D) valores de TS médios que permitem ainda hierarquizar as reflectividades, e que se aplicados á equação do Sonar activo possibilitam estimar distâncias de detecção. A aplicação de procedimentos comuns ao exercício da hidrografia, permitiu-nos reforçar a confiança na hipótese que as toneiras possam auxiliar os cetáceos enquanto alvo de sondagem acústica e que a tomada de medidas para as ocultar, será uma estratégia potencialmente eficaz de lhes condicionar a depredação. Porque estes valores TS derivam de testes com sinais de banda-curta em configuração bi-estática, acreditamos que a resposta e detectabilidade à sondagem dos golfinhos - mono-estática e com cliques de banda larga, será superior. A diferença observada de 15 dB para os $TS_{médio}$ entre as toneiras mais e menos reflectivas, permite-nos contribuír com conhecimento e recomendações aos pescadores sobre quais as toneiras, materiais e características de construção cujo uso devem privilegiar ou evitar, quando em faina na presença de golfinhos. A furtividade das toneiras será também conseguida: experimentando geometrias adequadas para reflectir o eco para direcção diferente da fonte; recorrer a técnicas de construção para absorção do sinal e o uso de materiais "acústicamente transparentes" na água. Como modelo para as toneiras "de Lastro", sugerimos os protótipos já testados como prova de conceito de *cloaks* acústicos destinados a aplicações submarinas (Zang et al., 2011 e Chen et al., 2017). Incentivamos o reforço na investigação para a compreensão dos processos de formação do eco de objectos; a inovação das tecnologias e estratégias para a redução do *Target Strength* (ou do *Scattering Cross Section*) para ocultação de alvos a sondagens acústicas e se acompanhe a evolução da investigação inerente aos conceitos para a furtividade, como o *acoustic cloaking* e os metamateriais, desta forma também servindo a hidrografia e a busca submarina.

Agradecimentos

Temos a agradecer ao CINAV; à Escola Naval, nomeadamente aos docentes e militares do Dept. das Engenharias; ao Arsenal do Alfeite, S.A., nomeadamente aos Srsº Eng. Parreira, mestre Pedro e restante equipa técnica do tanque de acústica submarina; ainda aos pescadores na ilha de São Miguel; à Lotaçor, Serviços de Lotas dos Açores, S. A., nomeadamente ao Eng. Luís Rodrigues e funcionários dos vários entrepostos e à Srª Eng Clara Cramez (Poliversal SA | Plasteme SA). Este projecto beneficiou ainda do suporte financeiro dos projectos DEEPFLOAT e SIDENAV.[1]

REFERÊNCIAS

Au, W. W. L. & Hastings, M. C. (2010). Principles of Marine Bioacoustics. *Springer*.

Blattenberger, K. (s.d.). "Speed of Sound in Various Materials". Acedido em Outubro de 2019 no sítio http://www.rfcafe.com/references/general/velocity-sound-media.htm.

Chen, Y., Zheng, M., Liu, X., Bi, Y., Sun, Z., Xiang, P., et al. (2017). Broadband solid cloak for underwater acoustics. 10.1103/PhysRevB.95.180104.

Cruz, M, J., Silva, M., Jordão, V., Pereira, J. G., Santos, R. S. (2014). Risso's dolphin depredation in the Azorean hand-jig squid fishery: Assessing the impacts and evaluating effectiveness of acoustic deterrents. *ICES Journal of Marine Science*. 71 (9), 2608-2620.

Lurton, X. (2002). An Introduction to Underwater Acoustics, Principles and Applications. Springer.

Zhang, S., Xia, C., & Fang, N. (2011). Broadband Acoustic Cloak for Ultrasound Waves. 10.1103/PhysRevLett.106.024301.

[1] Este documento não obedece ao novo acordo ortográfico.

Levantamentos hidrográficos - classificação e recomendações

C. Monteiro (1), J. Vicente (1), L. Veiga (1), C. Marques (1), J. Cruz (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Lisboa, Portugal.- cristina.monteiro@hidrografico.pt

(2) Instituto Hidrográfico.

Resumo: Qualquer levantamento hidrográfico (LH), independentemente do seu objetivo, do sistema de aquisição, das metodologias seguidas e da qualidade obtida, pode ser classificado recorrendo à Matriz da S-44 (6.ª edição) da Organização Hidrográfica Internacional (OHI). Para os levantamentos hidrográficos efetuados para efeitos de segurança da navegação, estão definidas pela OHI, Ordens de classificação. No entanto, para todos os outros fins, a classificação deverá ser atribuída/requerida pelas entidades competentes. Para auxiliar e uniformizar a classificação destes levantamentos, promover o reconhecimento internacional dos critérios e a reutilização dos dados, a OHI desenvolveu uma matriz que identifica os critérios relevantes dessa classificação e define, para cada critério, uma escala de qualidade abrangente e ajustável a qualquer levantamento. São apresentados exemplos e recomendações a ter em conta na execução e classificação de levantamentos, salientado a importância de comprovar e documentar o valor atribuído a cada critério classificado.

Palavras-chave: classificação**,** levantamentos hidrográficos, OHI, recomendações.

1. INTRODUÇÃO

No encalço de uma economia azul focada na sustentabilidade da exploração, preservação e regeneração do meio marinho, as políticas nacionais (e comunitárias) aplicadas um pouco por todo mundo, em especial nos países mais desenvolvidos, vieram enaltecer a importância de utilizar dados técnico-científicos credíveis e atualizados, para apoiar e sustentar os planos de gestão, monitorização e ordenamento dos espaços marítimos e das respetivas zonas costeiras.

Os dados hidrográficos, que tradicionalmente foram utilizados maioritariamente para fins ligados à segurança da navegação e à cartografia náutica, passaram a ser informação fundamental para uma grande diversidade de estudos e áreas de atuação, como por exemplo: biologia marinha, engenharia, gestão portuária; pescas, prospeção, desportos náuticos, energias renováveis, gestão do litoral, náutica de recreio, geofísica, geologia, estudos de dinâmica sedimentar, erosão costeira, entre outras.

Por outro lado, o aparecimento de novas tecnologias e de inúmeras plataformas de sondagem autónomas (que permitem recolher mais dados, em locais de difícil acesso e em melhores condições de segurança), o desenvolvimento de algoritmos alternativos que permitem derivar batimetria (e.g. através da inversão do campo de ondas; imagens multiespectrais adquiridas por satélite ou drones, entre outras), a evolução da capacidade de manuseamento e armazenamento de dados, o desenvolvimento das técnicas tradicionais (acústica submarina), assim como a difusão de políticas de cedência de dados e/ou disponibilização de serviços gratuitos que apresentam informação de base hidrográfica tratada e georreferenciada, têm contribuído para:

- Desenvolver a relação entre a procura e a oferta de dados hidrográficos;
- Elevar o reconhecimento da importância da informação hidrográfica e, consequentemente, da necessidade de a manter atualizada;
- Rentabilizar os trabalhos, quer seja pelo ajustamento entre a qualidade exigida e o objetivo do levantamento, quer pela partilha e reutilização de dados para fins diferentes do seu propósito inicial.

A Organização Hidrográfica Internacional (OHI) atenta à evolução da Hidrografia enquanto ciência, e às necessidades impostas pela utilização generalizada de dados hidrográficos, decidiu atualizar a publicação S-44 'IHO *Standards for Hydrographic Surveys*', tornando-a mais abrangente e adaptada à generalidade dos levantamentos hidrográficos (até então, a publicação contemplava exclusivamente os levantamentos para efeitos de segurança da navegação).

Neste sentido, foi criada pela OHI (2020) uma «matriz» de classificação de levantamentos, com o intuito de auxiliar as entidades produtoras e/ou competentes na classificação dos levantamentos hidrográficos. Esta ferramenta pretende uniformizar, de forma global, os critérios relevantes de classificação, estabelecendo uma escala de qualidade para cada critério ajustável, adaptada a qualquer levantamento.

Segundo Vicente *et al.* (2022), a escolha adequada das células da matriz permite classificar toda a gama de levantamentos: desde levantamentos sistemáticos realizados com sistemas de aquisição de alta resolução e conduzidos e processados por hidrógrafos qualificados, até aos levantamentos expedidos feitos

por não especialistas em situação de trânsito ou através de métodos indiretos e experimentais, recorrendo a veículos autónomos e/ou equipamentos de baixo custo ou sondas de navegação ou de pesca, entre outros.

Sempre que um levantamento tenha mais que um objetivo, os requisitos devem ser estabelecidos em função do objetivo que apresenta maior exigência. Os requisitos devem ser verificados e documentados individualmente.

2. CLASSIFICAÇÃO

O Instituto Hidrográfico, enquanto entidade reguladora da cartografia hidrográfica em território nacional, recomenda que a classificação dos levantamentos hidrográficos seja baseada na publicação S-44 da OHI. Os levantamentos para efeitos de segurança da navegação devem ser classificados em ordens, podendo ser acrescentada à ordem alguma(s) célula(s) da matriz para incrementar a exigência de alguns dos requisitos mínimos exigidos para essa ordem. Os restantes levantamentos podem apoiar a sua classificação nas células da matriz, para os critérios avaliados, desde que devidamente comprovados e documentados.

A classificação deve ser atribuída sempre no final do levantamento, após a verificação dos valores de qualidade alcançados. No entanto, na maioria dos levantamentos realizados no panorama nacional, nomeadamente no âmbito da prestação de serviços, o processo de classificação segue as seguintes etapas, apresentadas por Vicente *et al.* (2022) e resumidas na tabela i.

Tabela i. Etapas da classificação de levantamentos hidrográficos.

Etapa **Entidade**	**Descrição**
Conceção **Entidade requerente**	Identificação da necessidade/objetivo; Elaboração das especificações técnicas incluindo a definição: - dos requisitos mínimos adaptados ao objetivo; - dos entregáveis (dados; produtos e documentação).
Proposta (análise) **Entidade requerente**	Análise da capacitação: verificar se a entidade proponente reúne as seguintes condições: - comunicação prévia para o exercício da atividade; - equipamentos; - metodologias; - recursos humanos, etc para efetuar o levantamento satisfazendo os requisitos exigidos.
Levantamento Hidrográfico (LH) **Entidade executante**	Planeamento dos trabalhos. Aquisição e processamento de dados. Elaboração dos produtos finais e da documentação técnica, incluindo: - **classificação do levantamento em função da qualidade dos dados validados, justificando adequadamente, para cada critério/requisito, os valores alcançados.**
Conformidade do LH **Entidade requerente** (ou por entidade independente de consultoria)	Avaliação da conformidade do LH, através da confrontação entre as especificações técnicas dos entregáveis *versus* especificações técnicas contratualizadas: - verificar se os requisitos mínimos pré-definidos foram alcançados e se estão devidamente comprovados e documentados.

Uma grande parte dos trabalhos hidrográficos envolve, para além das medições de profundidades, outras medições de elementos em terra e na própria água. Para abranger todos estes elementos, a matriz encontra-se subdividida em 4 temas (OHI, 2020).

Os exemplos de classificação que se seguem são concretizações da matriz, apenas do tema de 'batimetria', de levantamentos realizados para propósitos distintos e adquiridos com diferentes sistemas de sondagem e um dos exemplos (*2.3*) apresenta os requisitos mínimos exigidos por uma entidade portuária, na sua área de jurisdição. Na Fig. 1, a cada exemplo é atribuída uma cor, facilitando que seja feita uma comparação intuitiva entre os parâmetros de qualidade destes exemplos. Nesta figura, também podem ser analisadas as *strings* correspondentes, às ordens de classificação, definidas pela OHI, para efeitos de segurança à navegação:

Ordem 2 "Ba5, Bb2; Bc7, Bd4; Bh3"

Ordem 1b "Ba8, Bb3; Bc8, Bd6; Bh3"

Ordem 1a "Ba8, Bb3; Bc8, Bd6; Be5 e Bf3 para profundidades>40m; Bg9; ≤Bh9"

Ordem Especial "Ba9; Bc10, Bd8; Be6; Bg9; Bh9"

Ordem Exclusiva "Ba10; Bc12, Bd8; Be9; Bg12; Bh12".

2.1. Crowd Sourced (vermelho)

Um conjunto de dados de *Crowd Sourced*, adquirido em águas profundas, de modo não sistemático, com uma sonda de navegação (feixe simples) e sem correção da velocidade do som, por um navio mercante, num trânsito ao atravessar uma zona cuja informação batimétrica disponível é escassa e antiga. Este levantamento, após análise dos dados, das características da sonda e do tipo de posicionamento, é classificado, de acordo com a matriz da S-44, através da seguinte *string "Ba3, Bc5, Bd3"*.

2.2. Engenharia (azul)

Levantamento sistemático de suporte à construção de uma estrutura portuária, na fase de engenharia de pré-construção e *design*, efetuado por hidrógrafos

	Critérios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
B	BATIMETRIA														
a	Profundidade THU [m]	500	200	100	50	20	15	10	5	2	1	0.5	0.35	0.1	0.05
b	Profundidade THU [%]*	20	10	5	2	1	0.5	0.25	0.1						
c	Profundidade TVU "a" [m]	100	50	25	10	5	2	1	0.5	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05
d	Profundidade TVU "b"	0.20	0.10	0.05	0.023	0.02	0.013	0.01	0.0075	0.004	0.002				
e	Detecção Estruturas [m]	50	20	10	5	2	1	0.75	0.7	0.5	0.3	0.25	0.2	0.1	0.05
f	Detecção Estruturas [%]*	25	20	10	5	3	2	1	0.5	0.25					
g	Busca por Estruturas [%]	1	3	5	10	20	30	50	75	100	120	150	200	300	
h	Cobertura Batimétrica [%]	1	3	5	10	20	30	50	75	100	120	150	200	300	

* [% da profundidade]

THU - Total Horizontal Uncertainty.

TVU - Total Vertical Uncertainty. $TVU_{max}(d) = \sqrt{a^2 + (b \times d)^2}$

Crowd Sourced | Engenharia | Gestão Portuária | Deteção de objetos

Fig. 1. Concretizações de matriz de batimetria: 4 exemplos de classificação de levantamentos hidrográficos.

qualificados, com recurso a um sistema sondador multifeixe, baseado no posicionamento *Differential Global Navigation Satellite System* (DGNSS), em modo *Real Time Kinematic* (RTK) e sensor inercial. Para este levantamento, após análise dos dados e verificados para cada requisito os valores alcançados, a classificação, de acordo com a S-44 (6.ª ed.) é "Ordem Especial, Ba12", onde Ba12 representa um valor da matriz mais rigoroso que o previsto para a ordem especial.

2.3. Gestão Portuária (amarelo)

Neste exemplo, são apresentados os requisitos mínimos exigidos por uma autoridade portuária australiana, a PILBARA Ports Autority (PPA) que atualizou as suas próprias especificações em maio de 2021, fazendo referência à 6.ª edição da S-44 da OHI e às especificações nacionais. Para diversos objetivos no contexto da gestão portuária incluindo segurança da navegação e apoio a operações de dragagem, os levantamentos hidrográficos a efetuar nos canais de navegação assinalados pela PPA, deverão satisfazer os seguintes critérios "*Ba11; Bc13; Be9; Bh12"* da matriz da S-44.

2.4. Deteção de objetos (verde)

Levantamento efetuado com sonar lateral, com resolução de 7,5 cm, especificamente para detecção de estruturas, de dimensões pré-definidas superiores a 15 cm, para encontrar detritos de uma carga acidentada, numa zona considerada não crítica para a navegação esperada. Para este levantamento, após análise dos dados e das características alcançadas, a *string* de classificação, de acordo com a matriz da S-44, é a seguinte *"Be13, Bg12"*.

A classificação deve incidir apenas nos critérios que foram verficados e se encontram documentados. Os critérios não avaliados (por não serem aplicáveis) devem ser omitidos. Os requisitos que se venha a comprovar que não foram alcançados devem ser justificados em relatório, para apreciação da entidade competente (requerente) e aprendizagem futura.

3. RECOMENDAÇÕES

A avaliação da conformidade do levantamento hidrográfico deve ser efetuada pela entidade requerente ou por uma entidade independente de consultoria que tenha conhecimentos técnicos para tal. Esta avaliação deve incidir sobre todos os entregáveis, nomeadamente dados, produtos e documentação associada, incluindo o relatório técnico final.

O relatório técnico final deve descrever de forma objetiva e clara o processo de execução do levantamento e apresentar todos os resultados que comprovem que os requisitos e os objetivos, definidos inicialmente, foram efetivamente alcançados.

Segundo Vicente *et al.* (2022), na fase de avaliação de conformidade do levantamento recomenda-se a análise dos seguintes itens:

- Metodologias e procedimentos seguidos no decorrer dos trabalhos, tanto na fase de aquisição, como na fase de processamento de dados e elaboração dos produtos finais;
- Características dos equipamentos e *softwares* utilizados;
- Valores de *offsets* de instalação e de calibração dos diversos sensores, relativos ao referencial da plataforma (se aplicável);
- Verificação das medições em relação às marcas de referência oficiais, incluindo resultados estatísticos e subsequentes ajustes e calibrações;
- Controlo de qualidade, intermédios e finais, que constituam prova que os requisitos pré-definidos foram alcançados por meio de verificações e calibrações. Os requisitos que abrangem a maioria dos levantamentos são:
  - Incertezas vertical e horizontal alcançadas;
  - Análise da consistência e repetibilidade dos dados (estatística nas zonas de sobreposição);
  - Análise da cobertura batimétrica;
  - Análise da metodologia de busca e deteção de estruturas;
- Descrição das características dos produtos finais e dos algoritmos de seleção de sondas e construção de batimetria;
- Cálculo de volumes (se aplicável);

- Metadados (devem ser apresentados num formato *standard*, onde seja possível discriminar a classificação dos critérios alcançados). Para os levantamentos mais exigentes, salientam-se ainda algumas notas técnicas que devem ser tidas em conta, na conceção do levantamento hidrográfico (LH), na

realização dos trabalhos e na respetiva ação de conformidade.

3.1. Aplicabilidade do modelo do geoide

A maioria dos LH atuais, efetua a redução da sondagem ao Zero Hidrográfico (ZH), aplicando o modelo do geoide aos dados obtidos por DGNSS RTK. Esta metodologia, que veio substituir a utilização de dados maregráficos, é muito mais eficaz e gera dados mais consistentes. No entanto, é fundamental avaliar a aplicabilidade do modelo do geoide na área do levantamento, através de observações DGNSS RTK em marcas da Rede de Nivelamento Geométrico Alta Precisão (RNGAP) (ou derivadas por NG), para que se possam estudar as diferenças entre as altitudes ortométricas obtidas por aplicação do modelo e as referidas ao Nível Médio adotado (NMA), e corrigir os dados hidrográficos, se necessário. O porto de Sines é um exemplo concreto, onde se verificou um *offset* de -0,189 m, que após ser aplicado aos dados, tornou o respetivo modelo batimétrico menos profundo (IH, 2019).

3.2. Cobertura batimétrica e Deteção de Objetos

A Cobertura Batimétrica, conceito introduzido na 6.ª ed. da S-44 é a extensão da área de trabalho que foi efetivamente sondada, usando um método sistemático de medição da profundidade. Nos LH tradicionais, uma cobertura batimétrica de 200% corresponde a 50% de sobreposição entre faixas adjacentes, traduzindo uma melhor qualidade aos dados, quer por apresentar uma distribuição espacial mais homogénea das sondas, maior densidade de dados e redundância, que facilitam o processamento, interpretação e identificação de ecos falsos e a definição de objetos e estruturas. Embora esta percentagem seja adequada para LH de Ordem Exclusiva, o IH recomenda-a para Ordem Especial.

3.3. Produtos finais

Os produtos finais devem ser escolhidos, na fase da conceção, também em função do objectivo do LH e das características da área de trabalho. No que concerne aos produtos cartográficos finais, é importante definir *a priori* (e documentar *a posteriori*), em função das dimensões da área a representar e do objetivo proposto, a seguinte informação:

- Escala da implantação gráfica;
- Algoritmo de seleção de sondas;
- Algoritmo de construção das isobatimétricas;

Existem diferentes algoritmos para diferentes propósitos. Por exemplo, no âmbito do controlo de dragados, o produto cartográfico serve normalmente para visualizar se a profundidade de dragagem foi atingida em toda a área, neste caso, o algoritmo que seleciona as sondas mínimas deve prevalecer sobre outros algoritmos (e.g média).

É importante salientar que a avaliação da conformidade do LH não se restringe à análise da informação documentada, pode ser complementada com a análise dos dados e respetivos produtos finais. A classificação do LH, atribuída pela entidade executante, pode ser degradada se na fase de análise de conformidade, a entidade requerente apurar que os requisitos pré-definidos não foram alcançados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Perante a quantidade e a disponibilidade de novos dados hidrográficos, a OHI reconheceu a necessidade emergente de ter como ferramenta uma «Matriz» para classificar adequadamente os levantamentos que deram origem a estes dados, definindo critérios padrão suficientemente extensíveis para abranger a totalidade dos levantamentos, independentemente da sua tipologia. A OHI deixa às entidades produtoras e/ou competentes pelos dados a responsabilidade de classificação dos seus próprios levantamentos.

A Matriz por si só não é um *standard* (OHI, 2020), deve ser vista como um instrumento que apresenta um espectro de critérios muito abrangente e pormenorizado, e que permite classificar qualquer conjunto de dados hidrográficos independentemente da sua qualidade, da tecnologia do sistema de aquisição empregue e dos procedimentos e metodologias aplicadas (Vicente *et al.*, 2022).

É essencial realçar que tão importante como a realização de um levantamento hidrográfico é a definição dos requisitos adequados ao seu objetivo, bem como a certificação da qualidade dos dados resultantes, por forma a que estes possam ser utilizados para o fim em causa.

A partilha e a divulgação de dados e dos respetivos metadados permite que possam ser criteriosamente escolhidos e usados *a posteriori*, por uma série de novos utilizadores para os mais diversos fins, de uma forma ciente e assumindo a sua adequação ou apresentando as respetivas ressalvas, quando aplicável.

REFERÊNCIAS

IHO (2020). *Special Publication 44 – IHO Standards for Hydrographic Surveys*. (6th ed.). Mónaco. Disponível online versão original e versão portuguesa**Erro! A referência da hiperligação não é válida.**,https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s44/20211216_S44_Ed6_2.0.1_Portugu%C3%AAs_v2F.pdf acedida em 29-04-2022

Vicente, J. Monteiro, C. Marques, C. Veiga, L. (2022) *Classificação de Levantamentos Hidrográficos para efeitos de Engenharia.* Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária, 7 e 8 de abril 2022, Sines

A importância da formação em hidrografia para o conhecimento e gestão dos espaços marítimos sob soberania ou jurisdição portuguesa

J. Gouveia (1), Z. Cardoso (1), T. Candeias (1)

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

(2) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal

Resumo: Desde a sua criação, em 1960, que o Instituto Hidrográfico (IH) se tem dedicado a tarefas relacionadas com o conhecimento do mar, nas suas áreas de especialidade, entre as quais se destaca a hidrografia, que lhe dá o nome. Sendo desde sempre um órgão da Marinha com a missão de assegurar as atividades de investigação e desenvolvimento tecnológico relacionadas com as ciências e técnicas do mar com vista à sua aplicação prioritária em operações militares navais, este Instituto tem desenvolvido toda a sua atividade no âmbito do conhecimento do meio marinho colocando as suas capacidades ao serviço da Marinha e do País. Uma área elementar onde este trabalho tem dado frutos é a da formação e preparação de técnicos que possam realizar trabalhos nas suas áreas de especialização e responsabilidade, como é o caso da já referida hidrografia, mas, em boa verdade, também da cartografia náutica**,** da oceanografia, da geologia marinha, da segurança da navegação, da proteção e preservação do meio marinho, entre outras com estas relacionadas. A formação ministrada na Escola de Hidrografia e Oceanografia (EHO) constitui-se, assim, como uma das premissas de base que permitem ao IH a realização de tão meritório trabalho que se aplica em todas as áreas do conhecimento, do uso e da gestão consciente dos espaços marítimos baseados em adequadas condições de segurança, da exploração sustentável dos recursos do mar e da proteção do meio ambiente marinho. Isto é, em todas as áreas de interesse de um Estado com as caraterísticas de Portugal.

Palavras-chave: espaços marítimos; formação, hidrografia, Instituto Hidrográfico.

1. ENQUADRAMENTO

Qualquer Estado de pendor marítimo, como é o caso de Portugal, deve procurar tirar partido das vantagens, a todos os níveis, que o mar coloca à sua disposição. Esta ideia conduz-nos à necessidade de estes Estados possuírem uma Estratégia bem definida para gerir os seus espaços marítimos de forma a garantir a função de soberania, mas também a procurar conhecer o meio marinho de um ponto de vista holístico. Se alguns apontaram durante muitos anos a falta desta Estratégia holística em Portugal, o mesmo não se pode dizer em relação à área do conhecimento do mar em que o País, através de várias instituições com responsabilidade na área da investigação científica – como é o caso especial do Instituto Hidrográfico (IH) –, têm despendido um grande esforço no sentido de conhecer o meio e os seus recursos como base fundamental para as múltiplas aplicações noutras áreas que a informação e conhecimento obtido podem proporcionar.

Na sua dupla qualidade de órgão da Marinha e de Laboratório de Estado, o IH está preparado para cumprir a sua missão de apoio às operações navais, mas também de contribuir significativamente para conhecimento do mar em todas as áreas da sua especialidade. O seu lema "Conhecer o Mar para que todo os possam usar", é explicativo desta atividade desenvolvida ao longo de mais de seis décadas com resultados reconhecidos no seio da comunidade científica nacional e internacional e está em linha com a missão da Marinha "Proteger e promover os interesses de Portugal no e através do Mar".

Para que tal seja possível, é necessário possuir pessoal formado e treinado. Assim, na estrutura orgânica do IH constou, desde cedo, um serviço dedicado à formação em hidrografia. Embora no diploma da sua criação não estivesse previsto um serviço desta natureza, já constava nas competências do IH uma dedicada a *"Facultar a oficiais de marinha e a outro pessoal da Armada, no próprio Instituto ou em estabelecimentos de ensino e outros organismos adequados, os conhecimentos necessários ao bom desempenho dos serviços da especialidade, que hajam de ser-lhes confiados, fiscalizando o aproveitamento dos alunos nos respectivos cursos e estágios"*. Por outro lado, na estrutura orgânica do IH àquela data, competia ao Serviço de Hidrografia *"Organizar o curso de engenheiros hidrógrafos e outros que venham a ser criados para a preparação especializada do pessoal, de acordo com as directivas emitidas pelo Estado-Maior da Armada"*. Assim, até à criação do Centro de Instrução, em 1970, como uma unidade orgânica específica do IH, foram realizados vários cursos de formação de oficiais nestas áreas de interesse para o IH, para a Marinha e para o País.

Atualmente, e desde os finais da década de 70 do século XX, é à Escola de Hidrografia e Oceanografia (EHO) - que está integrada no Sistema de Formação Profissional da Marinha -, que cabe ministrar cursos de hidrografia destinados prioritariamente aos técnicos que desempenham ou virão a desempenhar funções no IH, mas também a outros alunos, nacionais ou estrangeiros, que o desejem e cumpram para o efeito os requisitos necessários.

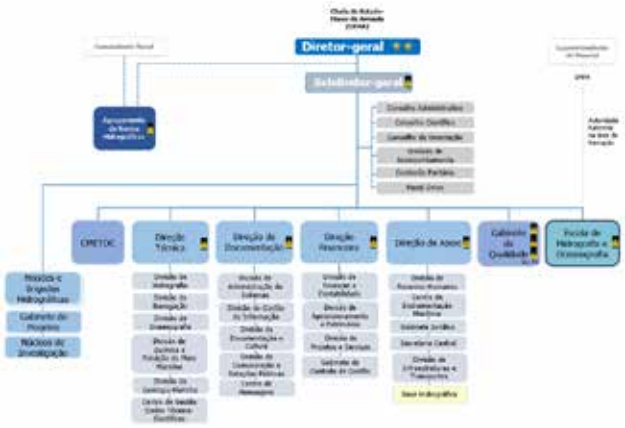


Fig. 1. Estrutura orgânica atual do IH.

É da competência da EHO promover a realização de estudos de natureza especializada e a difusão de conceitos, normas e métodos pedagógicos, visando a otimização do processo ensino-aprendizagem na área da hidrografia e oceanografia; coordenar os processos de reconhecimento internacional dos cursos de hidrografia pelo FIG/IHO/ICA *International Board on Standards of Competence for Hydrographic Surveyors and Nautical Cartographers* (Federação Internacional dos Geómetras - Organização Hidrográfica Internacional - Associação Internacional dos Cartógrafos) e garantir o cumprimento dos seus programas; assegurar o desenvolvimento e a realização das atividades pedagógicas, técnico-profissionais e os respetivos programas e; promover e coordenar as atividades conducentes à qualidade da formação, nomeadamente através da validação interna e externa.

De referir que a formação ministrada na EHO é reconhecida internacionalmente em conformidade com os padrões de competência estabelecidos para as categorias "A" e "B" pelo *FIG/IHO/ICA International Board on Standards of Competence for Hydrographic Surveyors and Nautical Cartographers (IBSC)*, sendo a única instituição de ensino de hidrografia em Portugal. Esta certificação foi obtida em 1983 para o então chamado "Curso de Especialização em Hidrografia" e em 1984 para o então denominado "Curso Intermédio em Hidrografia e Oceanografia". Saliente-se que a EHO é a única escola nacional com cursos deste tipo certificados pela OHI.

Em termos da evolução desta área, ainda antes da criação do IH e depois desse facto (1960), refiram-se os seguintes marcos:

1836 – Criação do 1.º Curso de Engenheiro Hidrógrafo, por decreto de D.ª Maria II.

1925 - Criação da Especialização de Hidrografia e Navegação para Oficiais de Marinha.

1963 – Frequência dos primeiros cursos de Engenheiro Hidrógrafo no estrangeiro por militares da Marinha Portuguesa.

1970 - Criado o Centro de Instrução de Hidrografia e Oceanografia que mais tarde deu origem à EHO.

1982/1983 - Realização do 1.º Curso de Especialização de Oficiais em Hidrografia, destinado a Oficiais da Escola Naval.

2005 - Criação do Curso de Especialização em Hidrografia para Sargentos que substitui o Curso de Especialização em Hidrografia para Sargentos e Praças, que teve apenas uma edição no ano letivo 2001/2002.

Contudo, além da formação aqui ministrada, o IH procura complementar os conhecimentos dos seus técnicos com especializações, normalmente obtidas em universidades estrangeiras. Tal é o caso dos engenheiros hidrógrafos que uma vez terminado o Curso de Especialização de Oficiais em Hidrografia na EHO vão a países como os EUA, o Canadá e a França ganhar conhecimentos avançados, principalmente nas áreas da hidrografia e da oceanografia.

2. IMPORTÂNCIA DA FORMAÇÃO EM HIDROGRAFIA

Tal como em todas as áreas da sociedade, a formação é um dos mais importantes pilares do desenvolvimento pessoal e profissional das pessoas e das instituições. No caso das ciências do mar, este ponto é tão mais importante porquanto o mar é um meio adverso e ainda desconhecido em grande parte das suas caraterísticas e potencialidades. Daí que o papel das instituições que, tal como o IH, se dedicam ao seu conhecimento seja da maior relevância para os respetivos países, mas também para toda a Humanidade.

A hidrografia é uma área específica deste conhecimento que, associada a outras como a oceanografia e as que já supra identificámos, permite perceber o que é afinal o mar, que caraterísticas possui, que recursos esconde e de que forma podemos trabalhar para o seu aproveitamento sustentável. O IH, que desenvolve atividades neste contexto em várias destas áreas, é, assim, uma instituição ímpar no panorama da investigação científica nas áreas do mar em Portugal.

O contributo que o IH tem dado à Marinha e ao País na formação na área da hidrografia e das restantes

relacionadas com o mar é por demais evidente em tudo o que se tem feito em Portugal neste domínio. O trabalho realizado em Portugal neste domínio desde há séculos tem tido aplicações práticas diversas da maior importância para a afirmação do País como um Estado que se preocupa com o mar e com o que este representa para o nosso futuro comum. De facto, as aplicações do conhecimento da hidrografia são muito vastas. Desde os primeiros levantamentos hidrográficos expeditos realizados pelos navegadores na época das descobertas para conhecerem a profundidade dos locais onde pretendiam aportar, até aos modernos sistemas de sondadores multifeixe, é hoje possível conhecer a profundidade e outras caraterísticas importantes para a navegação e outras atividades marinhas e marítimas. Este conhecimento é, pois, aplicável no âmbito da segurança da navegação numa altura em que o transporte marítimo se assume, cada vez mais, como o meio de transporte mais eficiente e procurado a nível mundial, mas também noutras atividades como a colocação e gestão de cabos submarinos, a afetação de parcelas do mar a atividades de exploração dos seus recursos, ou ainda a identificação de outras parcelas que serão objeto de um regime de proteção ao abrigo de instrumentos legais internacionais como o Convenção OSPAR.

Sem técnicos formados nesta área, não estaríamos certamente no estádio em que nos encontramos no âmbito do conhecimento do mar e de tudo o que isso pode representar para o IH, a Marinha e o País. Refira-se, a título de exemplo, a quantidade de trabalhos em que o IH tem participado e os documentos estratégicos que daí têm resultado. Talvez os trabalhos conducentes à extensão da plataforma continental – com tudo o que isso significa em aquisição e processamento de dados à superfície, na coluna de água e especialmente nos fundos marinhos – possam ser apontados como os mais recentes, mas não podemos esquecer os milhares de horas de trabalho no terreno que tem sido realizado com outros objetivos igualmente relevantes para Portugal.

É ainda de ressaltar o reconhecimento internacional que esta formação permite aos técnicos do IH e que os coloca entre os mais bem preparados a nível mundial para desempenhar, inclusivamente, funções em organizações de referência no contexto do mar.

3. RESULTADOS DA FORMAÇÃO MINISTRADA NA EHO

A preocupação do IH em ministrar formação certificada pela OHI em hidrografia é amplamente justificada pelos resultados obtidos até este momento. Como já mencionado, além dos seus próprios técnicos, o IH disponibiliza a capacidade sobrante a outras instituições, nacionais e estrangeiras, cujos elementos aqui podem obter conhecimentos nesta área. Esta disponibilidade, usada até agora, por alunos de várias nacionalidades, tem permitido também estreitar relações de cooperação com Países Africanos de Língua Oficial Portuguesa (PALOP), mas também com outros países amigos, quer através de programas de cooperação que ligam as respetivas Marinhas, quer diretamente pelo IH, uma vez obtida a concordância da Marinha. No total, a EHO do IH já ministrou formação nesta área a 259 pessoas, entre as quais 148 militares da Marinha portuguesa, 34 civis portugueses e 77 militares e civis de várias outras nacionalidades (figuras 2 a 5).

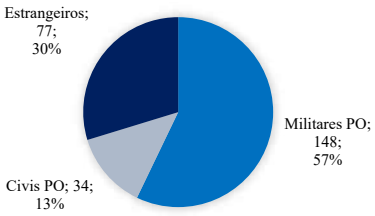


Fig. 2. Origem dos formandos da EHO.

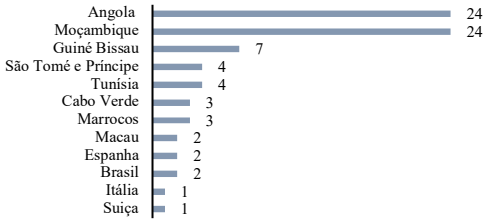


Fig. 3. Número de formandos estrangeiros por país de origem.

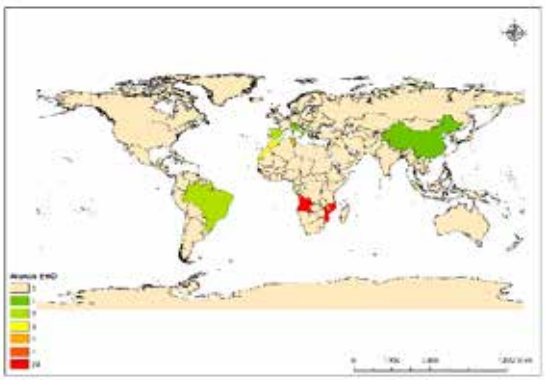


Fig. 4. Distribuição geográfica dos alunos estrangeiros.

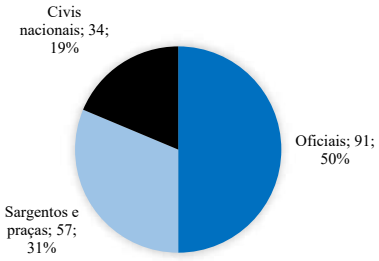


Fig. 5. Formandos portugueses por militares da Marinha e civis.

Ao longo dos anos, e como é possível verificar na figura 3, tem existido uma procura por parte de formandos oriundos da Comunidade dos Países de Língua Portuguesa (CPLP), demonstrando assim a importância do papel do Instituto Hidrográfico na formação em Hidrografia no panorama mundial, destacando-se pela sua formação em Língua Portuguesa, com qualidade igual há das instituições parceiras.

4. NOVOS DESAFIOS NO ÂMBITO DA FORMAÇÃO EM HIDROGRAFIA

O conhecimento dos oceanos e de tudo o que ali se passa é uma responsabilidade de todos os Estados que detêm espaços marítimos sob sua soberania e jurisdição. Portugal tem vindo a investir na formação nas áreas do mar, nos seus diferentes campos de atuação e de necessidade de conhecimento.

Existe hoje um conjunto de cursos superiores e também de nível técnico-profissional dirigidos aos que pretendem desenvolver uma carreira ligada ao mar, seja ao nível da investigação científica, da proteção e preservação deste meio ou da exploração sustentável dos seus recursos. Se a formação de nível superior cabe às universidades, a formação de nível médio é ministrada em escolas e outras instituições que pretendem dar um cunho mais prático a esta formação. Tal é o caso da EHO que possui os dois cursos já mencionados reconhecidos pelo IBSC.

Todavia, atenta a necessidade de melhorar a formação ministrada nesta Escola adaptando-a a uma nova realidade das ciências e técnicas do mar, nas suas múltiplas aplicações, o currículo dos cursos aqui ministrados também têm de se adaptar a tal realidade.

O IBSC atualizou em 2018 os *standards* dos cursos de hidrografia de categoria "A" e "B", dando-lhes um cunho mais prático e virado para a obtenção da experiência de campo. Não descurando matérias de base essenciais e a sua aplicação neste contexto, privilegia-se agora a componente prática que permite aos alunos ir mais cedo para o terreno e aí desenvolverem as suas capacidades neste domínio. São também rearranjados alguns módulos atualizando as respetivas matérias e ajustando-as à utilização de novos equipamentos e metodologias de fazer hidrografia.

Terminando em 2023 a validade do reconhecimento do Curso de Especialização de Oficiais em Hidrografia (de categoria "A") a EHO tem agora a tarefa de propor ao IBSC uma nova estrutura para este Curso ajustada aos novos *standards* em vigor que deverá ser entregue até final do ano corrente. Nesta proposta, o IH pretende adaptar o Curso de modo a corresponder aos *standards* definidos internacionalmente sem prejuízo de atender as necessidades dos militares que irão desempenhar funções no IH. Como o reconhecimento do Curso Técnico de Hidrografia também terminará em breve, em 2024, também este Curso será reestruturado de acordo com aqueles *standards* com vista a torná-lo mais consonante com as atuais necessidades da formação em hidrografia.

O conhecimento do mar português como garante do seu aproveitamento sustentado na Estratégia Nacional para o Mar 2021-2030 e a iminente extensão da plataforma continental para além das 200 milhas, acentuando as responsabilidades nacionais e contribuindo para a exploração dos recursos naturais existentes no meio marinho, permitindo o desenvolvimento de novos conhecimentos científicos, são fatores que devem estar presentes no planeamento da formação nas áreas do mar para os próximos anos.

Um outro desafio que se colocará em breve à EHO é a contribuição no âmbito da formação para o IH-*Sensortech*.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No cumprimento da sua missão, o IH tem de continuar a estar dotado de pessoas habilitadas e preparadas para realizar atividades no âmbito das ciências e técnicas do mar, nomeadamente em hidrografia e oceanografia. A sua formação é, assim, considerada da maior importância em ações militares e também civis.

A EHO, vai, por isso, continuar a empenhar-se em procurar estar à altura desta necessidade, adaptando-se permanentemente a novas metodologias, matérias e técnicas que lhe permitam preparar cada vez melhor os profissionais de hidrografia para que possam realizar os trabalhos necessários neste domínio.

O conhecimento de todo o mar português, mas especialmente do espaço marítimo mais próximo da costa, como é o caso do mar territorial, e também dos espaços portuários, é fundamental para o desenvolvimento de todo o tipo de atividades que ali são levadas a cabo. Este conhecimento tem, entre outras áreas de aplicação, a segurança como contributo para a economia.

Se há muitas áreas em que o IH contribuiu e continuará a contribuir significativamente para dar realce à importância do mar para Portugal, a formação de técnicos nas áreas de interesse e responsabilidade da Marinha e do IH é certamente uma delas.

REFERÊNCIAS

IBSC (2018). Standards of Competence for Category "A" Hydrographic Surveyors (Publicação S-5A, 1.ª Edition, junho 2018.

IBSC (2018). Standards of Competence for Category "A" Nautical Cartographers (Publicação S-8A, 1.ª Edition, junho 2018.

IH (2021). Instituto Hidrográfico. 60 Anos ao Serviço do Conhecimento do Mar, 1ª Edição.

A Hidrografia num futuro não tripulado

C. Marques (1), J. Vicente (2)

(1) Instituto Hidrográfico. videira.marques@hidrografico.pt
(2) Instituto Hidrográfico.

Resumo: O Instituto Hidrográfico (IH) abrange um vasto conhecimento técnico e operacional nas áreas da Hidrografia, Oceanografia, Geologia e Química Marinha, sendo uma referência internacional nestas áreas. Realiza trabalhos multidisciplinares recorrendo a várias plataformas e equipamentos científicos com pessoal especializado. A evolução tecnológica vem direcionando os novos meios para a autonomia e automatização, potenciando as capacidades já existentes, assegurando a economia de recursos e salvaguardando a compatibilidade com uma economia azul sustentável. Estes avanços tecnológicos permitem já uma reorganização dos conceitos de emprego dos meios e equipamentos científicos visando a otimização dos resultados associada a minimização dos custos. O IH faz uso do seu dinamismo na busca de novas soluções, visando a flexibilização e otimização dos meios, e garantindo a eficácia, o equilíbrio e a produtividade nos seus trabalhos. Faz-se aqui uma análise do futuro dos meios de emprego na realização de trabalhos multidisciplinares.

Palavras-chave: AUV, ROV, UAV, USV, autonomos, unmanned.

1. INTRODUÇÃO

Os levantamentos hidrográficos são uma ferramenta essencial nos dias de hoje por todo o mundo quer para a economia, a segurança ou mesmo para a sociedade. A necessidade que há relativamente poucos anos era quase exclusiva das instituições dedicadas à cartografia náutica, ou à segurança da navegação, é agora transversal a várias outras atividades e sectores, como a engenharia, a pesca, o comércio, e até a gestão territorial. A necessidade atual de informação regular de elevada resolução quer da batimetria quer das mais diversas características do mar e do fundo do mar, veio sobrecarregar as entidades produtoras de informação, abrindo as portas a novas oportunidades de negócio nesta área, com o aparecimento e crescimento de várias empresas ligadas à hidrografia.

No mundo em constante evolução, onde se pretende garantir o mínimo de custos nas tarefas efetuadas, o decisor é forçosamente confrontado com o sempre permanente dilema de como obter os mesmos resultados assegurando custos reduzidos. Acresce o facto de que uma larga maioria das necessidades atualmente identificadas estão ligadas à zona costeira, uma zona onde a gestão territorial e a prevenção de acidentes tem vindo a forçar a identificação em tempo quase real da evolução das características do mar e do fundo do mar. Esta zona costeira, sendo uma zona de transição mar-terra, é uma zona tradicionalmente perigosa para a execução de trabalhos no mar, onde a navegação coloca em risco a vida dos elementos envolvidos, e como tal, um local que tipicamente não é desejável para a execução de levantamentos hidrográficos.

Com um programa bastante ativo na identificação e caracterização oceanográfica e hidrográfica, pretendendo conhecer todo o fundo do mar português até ao final de presente década, o Instituto Hidrográfico (IH) mantém nas suas tarefas a execução de levantamentos hidrográficos, garantindo elevada resolução e cuidado especial na aquisição dos dados, associando a estas as tarefas regulares de investigação científica dedicada não só à hidrografia, como à oceanografia e geologia marinha. Naturalmente, na sua busca por otimização de recursos e procedimentos, o IH segue de perto a evolução da tecnologia, dos materiais e da construção e desenvolvimento de novas plataformas e equipamentos vindo a investir no IH Sensortech por forma a permitir e facilitar a Investigação e desenvolvimento científico e tecnológico. Atualmente é inegável o avanço que se conseguiu alcançar na indústria na área das novas plataformas e no salto tecnológico em que todos se veem cada vez mais envolvidos. O futuro parece caminhar para o uso de novas plataformas e esta poderá ser a solução para alguns dos problemas que têm vindo a assombrar a gestão dos trabalhos hidrográficos.

2. PLATAFORMAS E EQUIPAMENTOS

Para a execução de levantamentos hidrográficos, além do pessoal qualificado, é necessário garantir a adequabilidade dos equipamentos escolhidos e das plataformas a usar. Tradicionalmente, e considerando a tecnologia mais direcionada para levantamentos hidrográficos de elevada resolução, usam-se equipamentos acústicos. No entanto, na atualidade são vários os novos métodos cuja aplicabilidade ganha notoriedade com os resultados obtidos. O espectro visual tem vindo a ser cada vez mais

utilizado, quer com o uso do laser aplicado ao LIDAR batimétrico (Irish 1998) (Figura 1), quer com o uso de SDB (Satelite Derived Bathymetry) que aplica a análise das várias bandas no espectro da luz, calculando a batimetria através de imagens multiespectrais (Stumpf 2003) adquiridas por satélite drone-UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Outras técnicas reconhecidas fazem uso da matemática na análise de imagem (Figura 2) ou dados Radar, calculando a batimetria através da inversão do campo de ondas num local (Bell 1999)(Bell *et al*. 2004)(Senet *et al*. 2008) (Santos *et al*, 2022), e é ainda de salientar os novos passos no uso de inteligência artificial e redes neuronais (Mandlburger *et al*, 2021) (Al Najar, Mahmoud *et al* 2021). Apesar da grande variedade de métodos atualmente existentes, a metodologia mais utilizada é ainda a utilização de sondas acústicas.

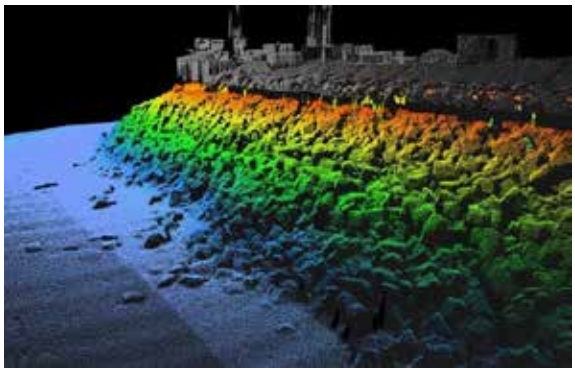


Figura. 1. Dados adquiridos com Lidar (@Ramboll Americas).



Figura. 2. Dados 3D laser scan + imaging - Draper Aden Associates.

A acústica funciona diretamente na água, pelo que as tradicionais plataformas para LHs são embarcações de sondagem dimensionadas para o local onde vão operar, consistindo em pequenas embarcações para águas interiores, crescendo até grandes navios para operar no alto mar, no meio do oceano. O uso destas plataformas está naturalmente bastante otimizado, no entanto, o desenvolvimento tecnológico veio permitir questionar diversas situações que sempre se consideraram inquestionáveis, como por exemplo a necessidade de navios de grande dimensão ser na realidade dependente da quantidade de pessoas a bordo. O desenvolvimento de materiais e a tecnologia atual veio permitir a construção de embarcações robot que dispensam parcial ou totalmente a intervenção do homem. Novos materiais permitem criar embarcações mais leves, de grande resistência material e, excluindo a presença humana, de dimensões muito mais reduzidas, sendo que a dimensão passa a depender apenas dos trabalhos executados e da capacidade de navegar e devida estabilidade no mar.

3. SISTEMAS NÃO TRIPULADOS

Os sistemas não tripulados são já a grande tendência do futuro. A poupança de recursos humanos, a segurança da vida humana com menor exposição aos vários fatores de risco dos trabalhos no mar, o redimensionamento das plataformas, a poupança no combustível, tudo parecem ser fatores favoráveis ao crescimento desta tendência.

Numa análise mais dedicada, poderemos dividir os sistemas não tripulados em 2 categorias, os sistemas autónomos e remotos. Na hidrografia há já espaço para sistemas não tripulados em todas as dimensões espaciais, subsuperfície, superfície e ar (Underwater, surface e Air), pelo que cada vez mais será evidente o uso por parte da hidrografia, em várias formas que se assumem familiares, os UAV (unmanned Aerial Vehicles), AUV (Autonomous Underwater Vehicles), USV (Unmanned Surface Vehicles), ROV (Remote Operated Vehicles).

Os AUV (Figura 3) são provavelmente os robots mais avançados tecnologicamente à disposição do homem comum. São sistemas assentes em plataformas que podem navegar a mais de 6000m de profundidade, com um payload de equipamentos invejável a algumas embarcações normais de hidrografia (sonar lateral, sintethic aperture sonar (SAS), sistemas multifeixe (SMF), SubBottom Profiler, Magnetómetros, câmeras HD, posicionamento acústico, Inertial measurement unit (IMU), acoustic doppler profiler (ADCP), GNSS para posicionamento à superfície, entre outros sensores. Os AUV, devidamente equipados, permitem o mapeamento do fundo do mar com a mais elevada resolução, assim como a busca por objetos ou a inspeção de estruturas.

Os AUV são sistemas não tripulados já utilizados há vários anos, no entanto a tecnologia permitiu baixar o seu custo, a aproximar a sua utilização ao meio mais comum.



Figura. 3. AUVs (modelo Hugin @ Ocean Infinity).

Os USVs (Figura 4) são a evolução da plataforma mais utilizada na atualidade na hidrografia. A aquisição de dados no mar é efetuada tipicamente a partir da superfície, nas embarcações e navios são colocados os sensores necessários à obtenção de dados. Com o aparecimento de USVs esta prática mantém-se, embora seja agora possível reduzir consideravelmente o tamanho das plataformas, já que uma grande parte do espaço existente num navio é dedicado à habitabilidade humana, e talvez a parte que mais dimensiona um navio seja o sistema de propulsão. Com a inovação do Unmanned, o espaço de habitabilidade desaparece, o navio fica mais pequeno, o sistema propulsor é redimensionado para mais pequeno e toda a plataforma encolhe para dimensões que são agora apenas o necessário para acomodar todos os equipamentos e assegurar a sobrevivência da plataforma em condições adversas de mar. Facilmente passamos de navios de 70m para embarcações de 15m, com toda a poupança que daí advém quer na sua aquisição, quer na sua utilização e manutenção. Ao contrário dos AUV, tipicamente estas plataformas são ainda apenas não tripuladas, Unmanned, o que significa que necessitam da intervenção humana a tempo inteiro na sua operação, situação que se deve essencialmente a motivos de segurança no mar. É no entanto de salientar que existem já modelos ASV, apesar do seu uso não estar legalmente enquadrado em praticamente nenhum país.



Figura. 4. USV (Seakit XL @ Seakit).

Os ROV (Figura 5) são sistemas já usados há bastantes anos, que não são mais que robôs remotamente operados, em geral são utilizados para trabalhos de precisão ou investigação pormenorizada. Sendo já um sistema em uso e que corresponde à extensão da operação humana, não interessa aqui avançar no seu detalhe.

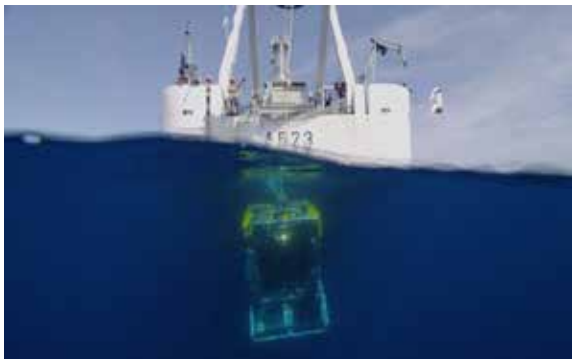


Figura. 5. ROV Luso ©Nuno Sá.

Os UAV (Figura 6) são os sistemas em uso no ar. São geralmente utilizados com novas metodologias para a aquisição de batimetria, com a aquisição de imagens multiespectrais, ou dados lidar. São sistemas em constante evolução, plataformas de baixo custo e com uma curva de aprendizagem na sua utilização bastante rápida. Os UAV são já na sua maioria utilizados como AAV, apesar de legalmente não ser aceite essa utilização em Portugal assim como na maioria dos países. No entanto, o desenvolvimento tecnológico, e algorítmico permite já uma utilização bastante segura destas plataformas em modo completamente autónomo. À semelhança das restantes plataformas não tripuladas esta plataforma pode fazer uso de apenas uma pessoa para adquirir dados numa área onde tipicamente se utilizaria uma embarcação com 3 pessoas ou mais, sendo que a velocidade utilizada pelo UAV é bastante superior, cobrindo a mesma área de levantamento hidrográfico num muito menor espaço de tempo.



Figura. 6. UAV (Matrice 300 @DJI).

4. O FUTURO

No futuro tudo aponta para o uso das mais diversas tecnologias inovadoras para transformar as operações no mar, de forma a permitir completar de forma segura os levantamentos hidrográficos, o

mapeamento preciso de estruturas, assegurando a obtenção de dados em tempo real.

Há todo o interesse económico em mudar radicalmente de paradigma, focando todos os esforços nos sistemas autónomos ou remotos. Os sistemas não tripulados são mais pequenos, mais económicos, mais seguros, mais eficientes, mais preparados para a problemática ambiental, com menor e mais fácil manutenção. Um navio hidrográfico para operações no mar facilmente ascenderá na sua aquisição acima de 150 milhões de Euros. Um USV com capacidades para navegar no mar e adquirir os mesmos dados, em tempo real, que o navio hidrográfico terá um valor inicial entre 2 a 5 milhões de Euros. Considerando que todos os custos subsequentes são mais favoráveis ao sistema não tripulado, será fácil compreender porque o futuro aponta para a automatização e operação remota.

A tecnologia robótica vem revolucionar a aquisição de dados no mar, usando plataformas inovadoras, não tripuladas, de baixas emissões de gases, que podem ser lançadas de qualquer parte do globo terrestre. Juntando esforços e avançando na modernização de uma frota, é já possível concretizar o plano de ter uma frota (Figura 7), um navio principal não tripulado, de maiores dimensões, que efetua o lançamentos dos mais diversos meios não tripulados em modo de frota para adquirir grandes quantidades dados, em tempo real, num determinado local, aliás é já mesmo o *modus operandi* de uma empresa internacional dedicada à aquisição de dados no mar.



Figura. 7. Frota não tripulada, segura e com aquisição de dados via satélite (@Ocean Infinity).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A evolução tecnológica e científica dos últimos anos trouxe ao mundo novos horizontes, com novas metodologias de aquisição de dados e equipamentos, e com inovações nas plataformas de sondagem. O uso de novas metodologias na hidrografia e oceanografia está com grande crescimento, quer para a obtenção de dados para os fins usuais, quer para novos fins que os novos métodos vêm descobrir ou permitir.

Adicionalmente, a evolução no desenvolvimento de materiais e algoritmia veio desvendar todo um novo mundo de plataformas não tripuladas. Juntam-se aos já tradicionais ROV, e aos antigos mas agora mais disponíveis AUV, as novas plataformas USV e UAV.

Estas novas plataformas podem ser equipadas com os tradicionais sistemas de aquisição de dados ou com novos sistemas que vem permitir o uso das mais recentes metodologias, traduzindo-se num elevado ganho na capacidade de aquisição de dados.

Imagina-se a realidade do uso de uma frota de USVs, equipada com AUVs e UAVs, com claros ganhos nos custos, na segurança, na eficiência e no tempo para a aquisição dos dados.

REFERÊNCIAS

Al Najar, Mahmoud; Thoumyre, Grégoire; Bergsma, Erwin; Almar, Rafael; Benshila, Rachid; et al. Satellite Derived Bathymetry Using Deep Learning. Machine Learning, Springer Verlag, 2021.

Bell, P., J. Williams, S. Clark, B. Morris and A. Vila-Concejo 2004, Nested Radar Systems for Remote Coastal Observations, Journal of Coastal Research SI39, pp. 483-487.

Bell, P 1999, Shallow water bathymetry derived from an analysis of X-band radar images of waves, Coastal Engineering 3-4, pp. 513-527.

IHO (2020). Special Publication 44 – IHO Standards for Hydrographic Surveys. (6th ed.). Mónaco. Disponível online versão original e versão portuguesa**Erro! A referência da hiperligação não é válida.**.

Irish, J.L., White, T.E., Coastal engineering applications of high-resolution lidar bathymetry, Coastal Engineering, Volume 35, Issues 1–2, 1998, Pages 47-71.

Mandlburger, G., Kölle, M., Nübel, H. et al. BathyNet: A Deep Neural Network for Water Depth Mapping from Multispectral Aerial Images. PFG 89, 71–89 (2021).

Santos, D.; Abreu, T.; Silva, P.A.; Santos, F.; Baptista, P. Nearshore Bathymetry Retrieval from Wave-Based Inversion for Video Imagery. Remote Sens. 2022, 14, 2155.

Senet, C. M., J. Seemann, S. Flampouris, F. Ziemer 2008, Determination of Bathymetric and Current Maps by the Method DiSC Based on the Analysis of Nautical X–Band Radar-Image Se-quences of the Sea Surface, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing 46(7), pp.1-9.

Stumpf, R. Holdereid, K.,and Sinclair,M., Determination of Water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types, Limnol. Oceanogr., 48 (1, part 2), 547-556 (2003).

The SIMShore Project and coastal shallow water – Current status

C. Marques (1), P. Pinto (2), P. Brasil (3), F. Marques (4), A. Silva (5), R. Silva (5), N. Catarino (5) A. Sivertsen (6)

(1) Instituto Hidrográfico, videira.marques@hidrografico.pt
(2) Instituto Hidrográfico,
(3) (2)Pixair,
(4) FCT- UNL,
(5) Deimos,
(6) Norce

Abstract: The Portuguese Hydrographic Institute, joined efforts with Deimos, Pixair, FCT-UNL and Norce, on a consortium for the SIMshore Project - SIMOcean Nearshore Bathymetry based on low-cost approaches, envisioning to build an operational updating service for topo-bathymetry at coastal areas. The aim is to develop a service model for updating costal shallow water topo-bathymetry, using available methodologies. SIMshore intends to use low cost methodologies, emphasising the derived bathymetry using images, either by analysing this visual spectrum of the ocean, or by the wave field inversion for surface waves, using low altitude images obtained from autonomous vehicles. It is expected to present the current status of the SIMshore project which started in late 2020, with a life expectancy of 2 years. Currently the project is on the data collection phase in order to validate methodologies and following on several use cases in Portugal.

Key words: AUV, coastal areas, derived bathymetry, drone satellite, SDB, unmanned aerial vehicle.

1. INTRODUCTION

Humans have historically focused their settlement near coastal areas, rivers, typical areas richer in food and privileged spots that would favour communication and trade. This behaviour has even increased in the last century with a tendency for the population to migrate from inland remote areas to coastal larger cities or small fishing villages. This migration and current climate changes have raised the consciousness about coastal erosion and the rising of sea level. Human activities either in rivers or directly on the coastal fringe have changed the coastal dynamics and contributed to an increase in coastal erosion and promoted changes in the sea bottom regular sediment transport. As a consequence the coastline is retreating and adding to the sea level rise and the storms increase in frequency and intensity there is now an urgent concern on "coastal protection".

Any intervention or monitoring in coastal areas is strongly dependent on the knowledge of the bathymetry in these areas. Whereas hydrography is nowadays a standard service around the world, surveying these areas on a regular basis, or as an urgent need, still presents a challenge to current methods and techniques due to the danger it presents not only for being shallow areas but also for the strong sea activity it constantly has. Also, using traditional acoustic surveys, conducted from small craft, combined with beach topography, is a task that is only financially viable at small repetition rates, and is always confined to a limited number of littoral domains and meteo-oceanographic conditions.

As technology improves, so does science and the methods and techniques that might be used to achieve similar results. The current Satellite Derived Bathymetry (SDB) technique, although providing much smaller accuracy, seems to assure better time resolution and has the advantage of allowing a near worldwide coverage.

The International Hydrographic Organization (IHO) has also acknowledged the importance and usefulness of new techniques, expanding from the traditional hydrographic surveys IHO (2020), and understanding that less accurate methodologies can be applied for different purposes.

Different techniques have been used to derive bathymetry from satellite Earth Observation (EO) products. Typically, most techniques based on light penetration on the seawater are focused on the differential penetration at different solar radiation bands (colour) and are used for calculating the bathymetry in shallower areas. Other techniques using the modification of the phase velocity of waves approaching shallower areas (using either visible images of the ocean surface, or Synthetic Aperture Radar (SAR) images) are used for less shallow areas and limited to wave height interaction with the seafloor.

Other non-acoustic recent techniques can also be used in shallow coastal areas as airborne surveys using dual frequency LIDAR (LIght Detection And R anging) a technique that uses laser beams to calculate depth, and consequently limited by the light penetration on water.

In the thematic of coastal erosion, and considering the regular or urgent need for bathymetric surveys on coastal shallow areas, the SIMshore project was born, aiming at building a service focused on cheaper solutions. SIMshore intends to develop a prototype service for the operational update of nearshore bathymetry, considering both data acquisition and data usage (access, processing, archiving, cataloging and the visualisation), focused on the users' needs.

2. THE SIMSHORE PROJECT

SIMshore is a 2 year project that started in late 2020 and is currently on its seventeenth month. This partnership joins efforts and expertise from 5 different entities, Deimos, Instituto Hidrográfico (IH), Pixair, FCT.UNL, from Portugal and NORCE from Norway, each with its specific role in the project.

The SIMshore promoter, Deimos, coordinated a previous EEA Grants Project SIMOcean designed to join together oceanographic data from different departments and entities, making it available in an Open Data System.

IH is the Portuguese Hydrographic Office the reference institution for hydrography and charting, presently researching derived bathymetry either from satellite data or Unmanned Aerial Vehicle (UAV) systems.

Pixair, is reputed company, fully capable to build and operate UAVs, coupling different types of sensors according to operational objectives.

FCT.UNL has been a leading reference institution in the area of autonomous vehicles, experiencing both design, operation, and sensor processing for different purposes.

NORCE is a leading research lab on UAVs in Norway, with extensive experience on design, and operations in coastal and marine environments, owing the imaging techniques needed.

SIMshore was designed to use UAVs, as this presents a wide range of possibilities. UAVs are easy to operate by skilled personnel and capable of accepting different types of sensors, ranging from simple video cameras to more sophisticated multispectral or hyperspectral devices, or even dual frequency LIDAR. Adding to this, the UAVs limitations are mainly related to meteorology, and currently available platforms are capable of enduring rather strong winds either using fixed wing or rotary wing vehicles, fitting as a cheap ideal useful platform, that can be used over time on a regular basis.

The planned activity list is as presented on Figure 1.

Activities		Promoter/ Partner
WP1 Project Management	Task 1.1 Project Management	DEIMOS
	Task 1.2 Quality Assurance	DEIMOS
WP2 Platform and Payload	Task 2.1 Payload Integration	PIXAIR
	Task 2.2 Payload Control	PIXAIR
	Task 2.3 Platform Testing	PIXAIR
	Task 2.4 Test Data Collecting Campaigns	PIXAIR
WP3 Data Systems	Task 3.1 Geo-referencing	NORCE
	Task 3.2 Algorithms for Bathymetry Estimation	IH
	Task 3.3 Processors	DEIMOS
	Task 3.4 Catalogue and Archive	DEIMOS
	Task 3.5 User Interface	DEIMOS
WP4 Validation	Task 4.1 Campaign Planning	IH
	Task 4.2 Data Collection Campaigns	PIXAIR
	Task 4.3 Validation	IH
WP5 Service Operations	Task 5.1 Business Assessment and Requirements	DEIMOS
	Task 5.2 Use Cases Definition	IH
	Task 5.3 Service and Offer	DEIMOS
	Task 5.4 Data Campaigns Operations	IH
	Task 5.5 Data Products Generation and Distribution Operations	DEIMOS
	Task 5.6 Business Plan	DEIMOS

Fig. 1. SIMshore Project activity package list.

Five distinct activities were chosen with tight connection between them. Besides the project management SIMshore time activity starts with the platform and payload integration activity package, together with the service operations package, following with the data systems activity package comprising the algorithms development and the validation package that sets the acceptance of acquired data and the methodology allowing the use cases to be completed and presented.

3. PLATFORM AND PAYLOAD

For the survey platform, SIMshore has chosen to use rotary wing UAVs as these can provide fast, wide coverage of the sea surface with optimum application of a colour-based approach. Also, these AUVs allow the use of the inversion of the surface wave field and the direct measurements of the wave celerity over a time interval considering it can simply hoover in a static position. The chosen platform was the DJI Matrice 300 RTK model, a 10 kg UAV using a maximum payload of 2kg. This UAV can fly over 30 min with full payload and withstand winds up to 15 m/s while flying.

The sensors that were selected to perform the survey were the MicaSense RedEdge MX multispectral camera, needed for sea surface color analysis and wave field measurements. Auxiliary sensors were selected for the purpose of validating the data acquired, as the Chameleon3 camera and Applanix APX 15 EI IMU were used together for georeferencing validation. Cameras and IMU are mounted together on a Gimbal for stability purposes.

Figure 2 shows the designed architecture for the platform and sensors payload used for SIMshore.

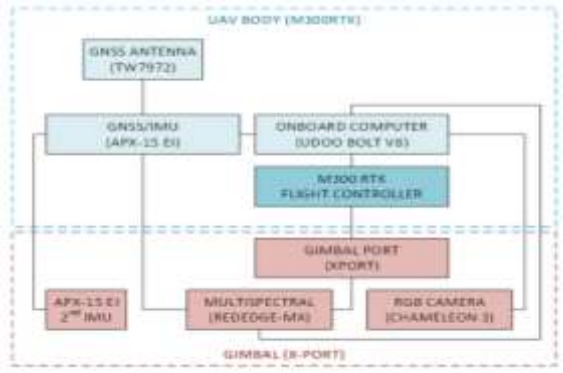


Fig. 2. Payload integration architecture.



Fig. 3. Drone and sensors ready for operation

The platform integration has been finished and tested. The drone is now fully integrated with all sensors (Figure 3). Test flights were performed with good results and data acquisition phase has started.

4. ALGORITHMS

SIMshore uses self-designed algorithms both for bathymetry estimation and georeferencing purposes.

Georeferencing algorithm produces georeferenced points on the ground, directly from single or a list of pixel coordinates. It also allows converting a camera image directly to a georeferenced geotiff image file. The accuracy depends on the accuracy of camera position and orientation provided by the onboard navigation system, the accuracy of the mean sea level data and the accuracy of the camera distortion coefficients. Two modes for georeferencing are being developed: a direct georeferencing of a nadir looking camera using the drone navigation state and the camera intrinsic and extrinsic parameters and a direct geo-referencing of a nadir looking camera using a secondary camera tracking stationary targets on shore, aiding in estimating the first camera extrinsic parameters. The first mode is intended to be used as the SIMshore method and the second mode is used for georeferencing validation purposes. These modes are pictured on Figure 4, with the second mode using geo referenced target on shore allowing the validation of the first method for surveying at sea.

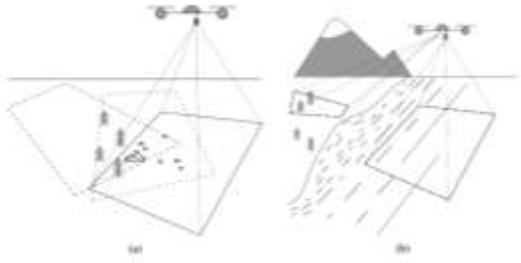


Fig. 4. Geo-referencing modes developed, a) direct single camera and b) direct dual camera

This algorithm is developed and currently being implemented and tested with the test data already acquired using the SIMShore payload set.

The algorithms used for bathymetry estimation try to cover both very shallow water (< 10m) and less shallow water (< 50m) areas.

The workflow for both algorithm starts with the data acquisition (imaging) of the survey area, then georeferencing the images (rectification) followed by the depth computation.

On shallow areas the water color method is used. Considering that the spectral radiant energy reflected by the water column is, among other variables, a function of depth, images acquired using the multispectral camera can be analysed using an empirical formulation (Equation 1) proposed by Stumpf *et al*. 2003 where it is necessary to use calibration probes in the calculation process and applied to each grid point.

$$h = m_1 \frac{\ln(nR_w(B))}{\ln(nR_w(G))} + m_0 \qquad \text{(Equation 1)}$$

where h is depth, Rw(B) and Rw(G) are observed blue and green reflectance bands, n is a constant, m1 and m0 are calibration parameters.

The color algorithm is currently developed and being tested, firstly on satellite data and subsequently on test data to be acquired using the SIMShore payload set.

For less shallow water areas a wave inversion method is used. Taking into account that gravity waves undergo depth induced changes in their shape and progression as they reach intermediate waters (depth/wavelength < 0.5), a simple relationship between the depth and wave celerity is commonly used in the context of bathymetry derivation through wave field inversion (Equation 2).

$$C = (gh)^{1/2} \qquad \text{(Equation 2)}$$

$$C = \left(gh\left(1 + \frac{H}{h}\right)\right)^{1/2} \quad \text{(Equation 3)}$$

where C is wave celerity, g is gravitacional acceleration, h is depth and H is local wave height at survey time

Stockdon and Holman (2000) used remote video cameras to estimate the shoreward propagation of wave speed to infer nearshore bathymetry, founding an error of approximately 13% in water depth retrieval. The SIMShore methodology uses the TimeStack imaging scheme to measure the wave crest speed along a cross-shore profile and then, by considering Equation 2, derive a depth profile. In this case only information retrieved by the camera is used. However, small modifications of Equation 2 that include nonlinear effects require auxiliary data. As a possible example to be tested, a formulation proposed by Booji (1981) is presented in Equation 3, to estimate the wave speed in shallow water. A set of images collected from a static position is analysed to get the input data for the calculation.

The wave field algorithm is currently being developed.

5. VALIDATION

A special activity package was designed for validation purposes only. Validation is the major step that sets the method to be used, and care was taken when choosing the methodology to do so. The derived bathymetry calculated on SIMShore will be compared with traditional acoustic single and multibeam data acquired at selected test locations at a close date. This comparison will allow to validate the results achieved with the bathymetry derivation algorithms and also will reinforce the comparison on the geo-referencing algorithm.

Validation sites were chosen in order to allow both bathymetric and geo-referencing algorithms to be accessed. The test sites were Azinheira bay area, Bugio and Caparica area in Lisbon, and Setubal estuary.

6. USE CASES

Coastal and estuarine zones, and to a lesser extent, inland waters, are characterized by short-term sea-bottom morphological changes that result from high exposure to naturally induced sedimentary remobilization processes and to anthropogenic interventions that, in conjunction, tend to disrupt the fragile equilibrium of these nearshore environments. Traditional hydrographic surveys, although accurate and straightforward nowadays, are not suitable to monitor the topo-bathymetry in these areas with the desired regularity, either due to limitations imposed by adverse oceanographic conditions or to high operation costs and logistical constraints.

Within the scope of the SIMshore project, three use cases were considered in order to demonstrate the usefulness and added value of the proposed service in circumstances that are not generally tackled by conventional hydrographic surveys, such as:

- bathymetry of navigation channels and adjacent areas,
- bathymetry of inland water bodies,
- topo-bathymetry of open coastal areas, exposed to wave conditions.

7. FINAL REMARKS

SIMShore project aims at developing a service updating nearshore bathymetry, including data acquisition, data access, processing, archiving, cataloging and the visualisation. It is a project focused on the user's needs, and several use cases have been designed considering different users feedback.

The platform and sensor integration is nearly over. Currently the project is on the validation phase, the platform and payload integration has been tested, geo-referencing and color based algorithms are on their test phases, while wave inversion is in development. Validation phase has now started and will be followed be the use cases to show the results that can be achieved.

Acknowledgments
Project SIMshore (https://simshore.pt/) is funded by the EEA Grants – Blue Growth Programme under Grant PT-INNOVATION-0027 – SIMShore, following submission EEA.BG.CALL1.025.2019 – SIMShore.

REFERENCES

Booji, N., (1981) Gravity waves on water with non-uniform depth and current. *Technical Report* nº81-1. Dept. Civ. Eng. Delft Universty of Technology

IHO (2020). *Special Publication 44 – IHO Standards for Hydrographic Surveys*. (6th ed.). Mónaco. Online:.https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s44/20211216_S44_Ed6_2.0.1_Portugu%C3%AAs_v2F.pdf (29apr2022)

Stockdon, H., and Holman, R., (2000) Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery, *Journal of Geophysical Research*, 105, C9, 22015-22033

Stumpf, R. Holdereid, K.,and Sinclair,M., (2003) Determination of Water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types, *Limnology and Oceanography*, 48 (1, part 2), 547-556.

4S Project, deriving bathymetry from satellite & UAVs images Case Studies

C. Marques (1), P. Pinto (2), C. Monteiro (2), A. Moura (2), C. Borges (2), K. Hartmann (3)

(1) Instituto Hidrográfico. videira.marques@hidrografico.pt
(2) Instituto Hidrográfico.
(3) EOMAP

Abstract: The Hydrographic Institute is a partner at the European '4S' (Satellite Seafloor Survey Suite) Project, supported by I&D Horizon 2020 Program. The aim is to develop a remote solution for mapping the sea floor, by deriving the bathymetry from satellite and UAV multispectral images. 4S intends to create an online cloud-based application, using Earth Observation algorithms, truly automated to remotely obtain different sets of data, as bathymetry and sea floor classification, among others, for shallow water areas. Using artificial intelligence, physical modelling and data from satellite/UAV, 4S will build an innovative tool for fast shallow water data assessment throughout the world. It is here expected to describe the evolution of this I&D 4S project, currently working on the use cases. 4S is leaded by EOMAP on an 8 partner's consortium that started in the end of 2020 with a 3 years life expectancy.

Key Words: bathymetry, satellite, SDB.

1. INTRODUCTION

Knowledge on coastal areas has invariably been a concern for society. Either for safety or management purposes, science is strongly involved in the challenging task of studying and monitoring the littoral range. The observation and comprehension of shallow water seabed, its habitats, its morphology, all is key for marine and coastal management, and part of the blue economy. Digital information on seabed characteristics is required for amongst others shallow-water dredging, sand reclamation, biological and geological research, safety of navigation.

Accordingly, a buildup on the demand for mapping and monitoring the shallow water regions exists. In order to acquire the necessary data, traditional acoustic methods are usually used, employing small platforms, when meteorological conditions allow for the work on coastal commonly ruthless sea areas. Nevertheless, newer techniques are emerging and. promising to deliver the requested data faster and still reliably for most applications.

Using modern satellite capabilities and Earth Observation (EO) analysis one can now significantly improve the current state of the art of data gathering of shallow water morphology, habitats and its transformation over time. While satellite imaging derived data is clearly limited in depth, as it is dependent on light penetration on sea water, a major advantage is that it is independent of navigational dangerous and also possesses a distinct dependence on meteo-oceanographic conditions.

EOMAP, a satellite derived information service provider, has been using Copernicus Sentinel-2 data physics-based modelling of aquatic EO together with, machine learning procedures, EO archiving and processing to derive bathymetry and other water characteristics in shallow waters. The 4S (Satellite Seafloor Survey Suite) project plans to deliver a cloud-based software solution (Hartmann *et al*. 2021) giving the users the necessary data to map and monitor seafloor depth, morphology and habitats at the distance of an internet connection.

2. THE 4S PROJECT

The 4S Project is born on a consortium of 8 partners with complementary roles outlined from their experience, fitting perfectly to establish an effective and productive working environment, generating the adequate desired final product. The consortium was set in order to have the final product built, tested, validated, demonstrated and published for a variety of users, from hydrographic, geologic and biological sciences. 4S will actively benefit from past and ongoing activities on national and international level, with the consortium partners (EOMAP - Germany, Hellenic Centre for Marine Research - Greece, Länsstyrelsen Västerbotten – Sweden, CNR - Istituto di Scienze Marine, Consiglio Nazionale delle Ricerche – Italy, Instituto Hidrográfico – Portugal, Fugro - Germany, QPS - Netherlands, Smith Warner Internationa - Caribbean) originating from diverse locations in the world, providing the project a multicultural approach and an international

involvement and subsequent connection with a variety of complementary projects.

The 4S Project, a 3 years project that started in November 2020, is aimed at delivering the user specific data for shallow coastal areas, data that is derived not only from the available satellite images, but also extending its capabilities to UAV (Unmanned Aerial Vehicles) multispectral images. The concept is to create a Satellite Seafloor Survey Suite for mapping and monitoring the shallow water zone using satellite-based information assimilated with on-site data and knowledge. The information provided to the user is a product of the analysis of remote sensed images with the EO data analysis accomplished from state-of-the art physical modelling. The physical modeling is of dominant significance, as 4S aims to achieve a harmonized and standardised analysis of satellite data, giving the solution the competence to be applicable globally in the shallow water zones, despite not having access to onsite data. The intention is to become independent of any local empirical fits and assumptions exploiting the use of EOMAP's physics-based inversion model MIP (Cerdeira-Estrada *et al*, 2012). Four main components used are shown in Figure 1, data sources, 4S Suite, interfaces, users, and applications. Figure 1 shows an illustration of the information and data flow from the EO raw data to applying derived information for the end-users needs.

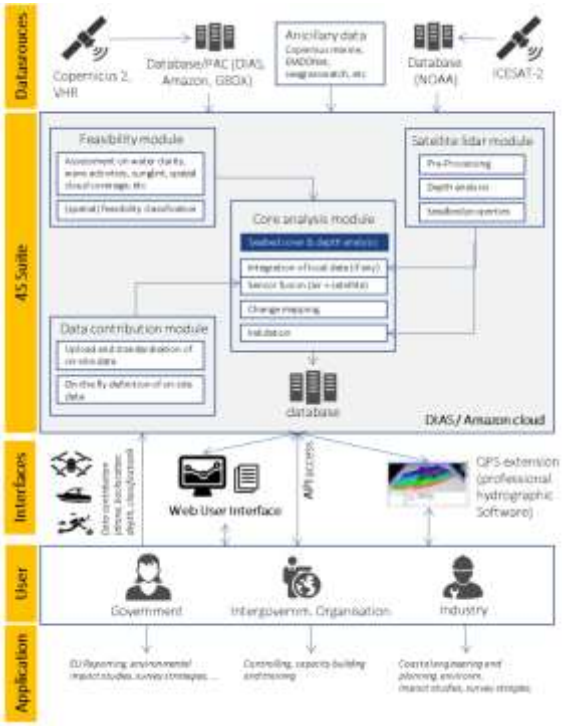


Figure. 1. 4S General Approach, information flow.

3. USE CASES

4S application will be added to software suite from QPS and revealed in selected sites on different countries with the consortium partners. The selected use cases are as follows: Sweden (Gothemburg, Västerbotten - Umea), Germany (Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern), Greece (Paros-Naxos, Kos), Italy (Crotone/Capo Rizzuto, Lagoon of Venice, Emilia-Romagna), Caribbean (Buccoo Reef - TnT, Falmouth - Jamaica), Portugal (Tagus estuary, Setúbal estuary, Baleeira & Portimão coastal areas), Global (Mombasa – Kenya, Sardinia – Italy, Gold Coast – Australia).

The purpose of the use cases is diversified, from hydrographic survey, coastal monitoring, sediment transport monitoring, habitat mapping, eelgrass mapping, biogeographical monitoring, tsunami modelling, environmental assessment, coastal erosion monitoring, ecological baseline mapping, hydrodynamic model performance for impact assessment and pre-lay cable route survey. Overall, SDB (satellite derived bathymetry) data is considered the baseline data for marine spatial planning and essential in better inform the decision making process. The final purpose of this multidisciplinary study is to improve the 4S methods/products through the comparison of SDB data with use cases traditional survey data. The acoustic data is the ground truth used for adjusting the algorithm for deriving from satellite or UAV multispectral images.

Instituto Hidrográfico (IHPT) focus on this project is on bathymetry and backscatter, being the main targets identified for scientific study from stakeholders. Subsidiary studies were identified such as sediment transport, coastal erosion monitoring, and morphological changes assessment. In Portugal, three sites were identified, Lisbon (Tagus estuary), Portimão (Baleeira and Portimão coastal area) and Setúbal (Sado estuary). The spotlight is placed on the first two sites, with Lisbon and Setúbal having a similar scope. The project has entered the use cases study phase and preliminary results can already be presented for Lisbon and Setúbal.

4. LISBON USE CASE

Lisbon use case is focused on the Tagus estuary and delta river development. While part of the estuary is clearly too deep for the method being used to produce results, the largest portion of the estuary is considered to be in the depth range for this method to be applicable. The main navigation channel is excluded from this study and the initial focus is set to Bugio area at the river delta, the interface river – ocean. Areas are shown in Figure 2 – note that blue areas are deep and results are expected only for green areas.

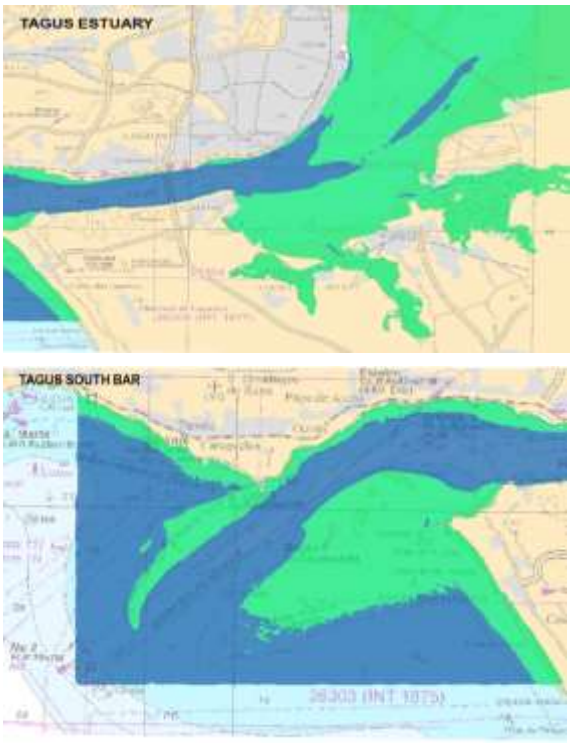


Figure. 2. Tagus estuary and river mouth, (blue – deep areas, green – shallow (<10m) areas).

The data used is from satellite Sentinel 2, with a spatial resolution of 10m, and the vertical datum the water level at time of satellite recording. The data was processed and reduced to chart datum for comparison with multibeam and single beam acoustic data available from traditional surveys by IHPT at close dates. Satellite data from Jan2021 to May2022 has been chosen carefully to avoid noise and identify the features as needed. From data analysis a river plume can be easily identified at several time periods along the year, depending mostly on tide, wind, and rain. Figure 3 shows this effect for data acquired 2h after the low tide, still less than halfway on the flood tide. This greatly limits the possibility of having SDB with the plume masking the seafloor.

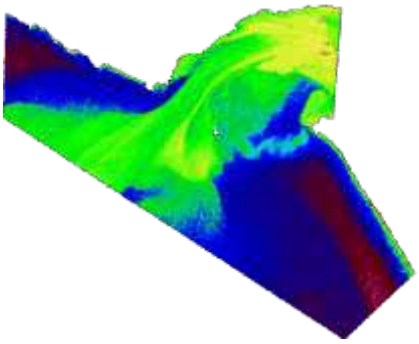


Figure. 3. Tagus river plume.

The river discharge is often strong enough to create a large plume that only recedes on high tide and mostly during neap tide periods.

Selecting data from satellite on time periods that favour low river plume, calm sea and low wind conditions is a difficult task for this location. Nevertheless, some images were selected and analysed for bathymetry as is shown on Figure 4.

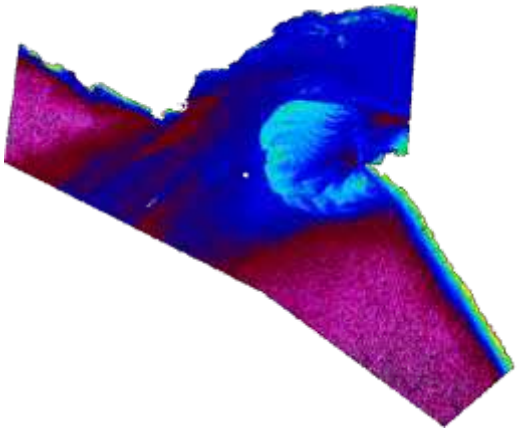


Figure. 4. Lisbon Bugio area bathymetry display.

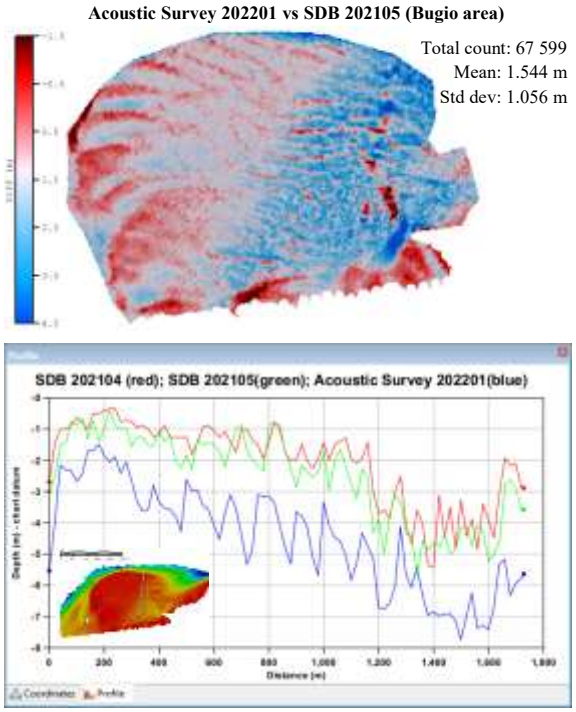


Figure. 5. Comparison 4S (SDB) vs Acoustic Survey (AS): a) surface of differences between AS202201 vs SDB202105; b) Profile view SDB202104, SDB202105, AS202201.

The derived bathymetry gives the user a valuable dataset for morphology analysis, showing all major features on the seafloor up to a depth of 7m. The data set was compared with high resolution multibeam and single beam acoustic data, with the obtained results shown on Figure 5 (e.g. Bugio case). For the purposes of comparison and statistical analysis with traditional measurements, specific areas without potential errors were selected from chosen SDB models, to which the cutting depth was also applied (approximately 7m referred to the *Chart Datum*). Morphology seems to have been well captured with this methodology with bathymetry values having an average difference of 1.5 m and a standard deviation of 1 m.

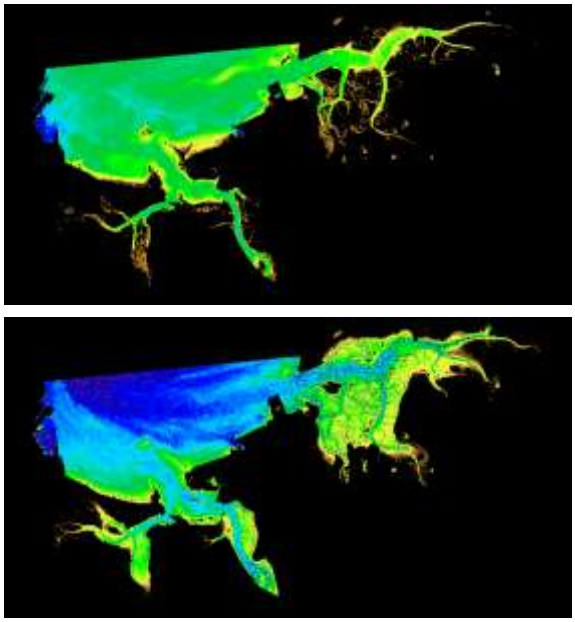


Figure. 6. Low tide vs High tide at the estuary.

Following an analysis on the inner part of the estuary, a quick analysis can be done about the wet area of the estuary, with Figure 6 showing a considerable difference on the flooded area on high tide.

5. SETÚBAL USE CASE

Setúbal use case is focused on the River Sado estuary Figure 7 and delta river development. The main channel of the estuary is again too deep for the method being used to produce results, almost all estuary is within the depth range for 4S method to be used.

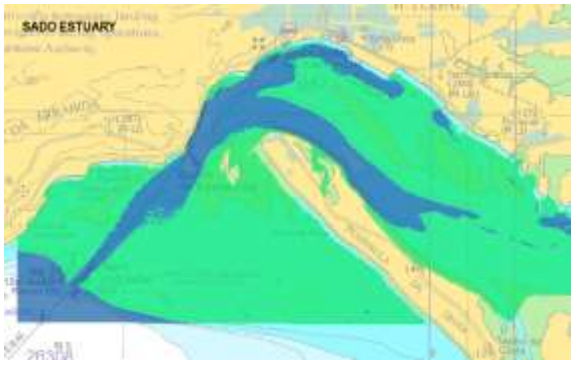


Figure. 7. Setúbal, Sado estuary and river mouth (blue – deep areas, green – shallow areas).

The satellite data used has similar technical characteristics to the data used for Lisbon. The time period selected for analysis was a single date in May 2022. Setúbal use case Figure 8 is presenting good values for the expected morphology, although the correct cutting depth is not yet defined.

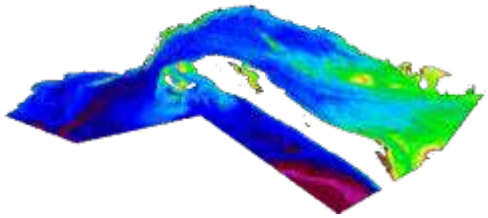


Figure. 8. Setúbal Sado estuary bathymetry display

6. FINAL REMARKS

The 4S (Satellite Seafloor Survey Suite) project, a consortium of 8 partners (EOMAP, Hellenic Centre for Marine Research, Länsstyrelsen Västerbotten, CNR - Istituto di Scienze Marine, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Instituto Hidrográfico, Fugro, QPS, Smith Warner International) that plans to create a cloud-based software solution for mapping and monitoring the shallow water areas using satellite-based information and EO data analysis using physical modelling.

Several use cases were selected from Germany, Sweden, Greece, Italy, Portugal, Caribbean, etc. The two Portuguese use cases analysed at this point are Lisbon Tagus estuary and Setúbal Sado estuary with very valuable results being significant to point out several aspects. The river plume is a large limitation on the SDB usage on these areas. The maximum usable depth seems to be identified calculating an index using coast blue and green bands, excluding most pixels in the water which values derive into bad depths. Using ground truth data from acoustic systems for comparison, the results are promising with less than 2m differences found in Lisbon.

Acknowledgments

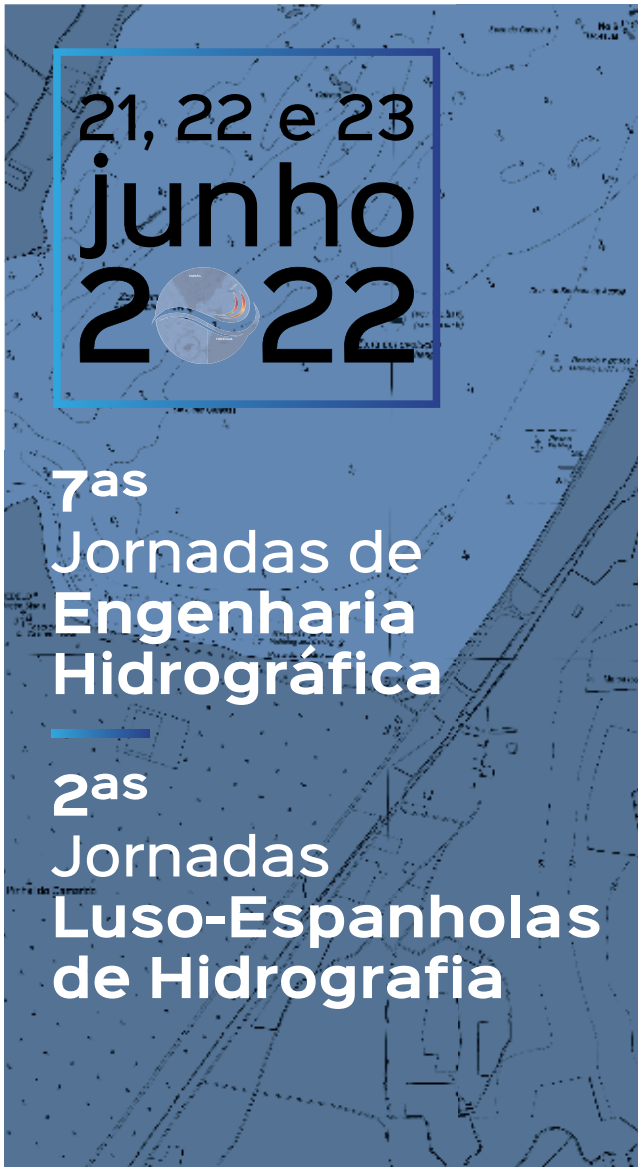
A special acknowledgment to Horizon 2020 as this project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No. 101004221.

REFERENCES

Cerdeira-Estrada S., Heege, T., Kolb M., Ohlendorf S., Uribe A., Müller A., Garza R., Ressl R., Aguirre R., Marino I., Silva R., Martell, R. (2012): Benthic habitat and bathymetrry mapping of shallow waters in Puerto Morelos reefs using remote sensing with a physics based data processing, Proc. IGARSS

Hartmann, K & Knauer, K & Heege, T & Kleih, C & Sandu, C & Mueller, A & Berglund, J & Friesen[2], C & Santos, Rúben & Marques[3], V & Moura[3], A & Filippone, M & Adhiwijna, D & Stender, M & Banton, J & Mondon, E & Beaudoin, J & Urdaneta, D & Rovere, Marzia & Sakellariou, Dimitris. (2021). 4S - Satellite Seafloor Survey Suite The European Project to map and monitor shallow water benthic and bathymetry, GeoHab2021

CARTOGRAFIA



A nova configuração da Rede Geodésica Nacional

H. Ribeiro (1), A. Bernardes (1), A. Medeiro (1), P. Patrício (1), M. Caetano (1)

(1) Direção-Geral do Território. hribeiro@dgterritorio.pt.

Resumo: A Rede Geodésica Nacional (RGN) é uma infraestrutura fundamental para apoio à produção da cartografia nacional, bem como a projetos que necessitam de uma georreferenciação rigorosa. No entanto, a utilização generalizada das novas técnicas de posicionamento proporcionadas pelas redes de observação contínua GNSS, que levaram a uma redução significativa das observações com recurso aos métodos clássicos apoiados nos vértices geodésicos, e a necessidade de melhorar o referencial geodésico nacional, justificam a redefinição da rede geodésica existente para o território continental. Neste sentido, a Direção-Geral do Território (DGT) promoveu uma avaliação das necessidades efetivas tendentes a criar uma nova configuração da RGN. Esta nova rede resulta de uma proposta elaborada pela DGT e acordada com o GTGeod2020, um grupo de trabalho constituído por especialistas da comunidade geodésica nacional. Nesta comunicação apresenta-se esta nova configuração e as estratégias para o estabelecimento de uma nova realização do ETRS89, tendo como base o ITRF2020.

Palavras-chave: GNSS, ReNEP, RGN, vértices geodésicos.

1. INTRODUÇÃO

A atual Rede Geodésica Nacional, constituída por 7963 vértices geodésicos (VG) em Portugal continental, é uma infraestrutura base de apoio à produção da cartografia nacional, assim como aos projetos em que seja necessário georreferenciar com precisão a informação. Esta infraestrutura é essencial para a realização de levantamentos topográficos e cadastrais, para atividades de planeamento territorial, para a construção e monitorização de infraestruturas, nomeadamente vias de comunicação, pontes, túneis ou barragens. Esta rede desempenha também um papel fundamental na execução de estudos de caráter geodinâmico.

A utilização generalizada das novas técnicas de georreferenciação, apoiadas nas redes globais de posicionamento (e.g. Rede Nacional de Estações Permanentes - ReNEP), conduziram a uma redução significativa das observações com recurso aos métodos clássicos apoiados nos vértices geodésicos. Contudo, as situações que exigem a realização de calibrações ou posicionamento de bases GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite), mais próximas do local de trabalho, têm que ser realizadas com recurso aos vértices geodésicos, justificando assim a necessidade da existência de uma rede geodésica que inclua este tipo de referências.

Neste sentido, a redução da utilização dos vértices geodésicos, que já se verifica há vários anos, e a necessidade de melhorar o referencial geodésico nacional, adotando uma realização do ETRS89 (Sistema de Referência Terrestre Europeu 1989) mais recente e recomendado pela EUREF (Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe), justificam a redefinição da configuração da rede geodésica no território de Portugal continental.

Assim, tendo como base de trabalho as diversas campanhas de observação GNSS dos VG de 1ª, 2ª e 3ª ordens, que ocorreram ao longo dos últimos anos, a DGT elaborou uma proposta para a restruturação da rede geodésica atual, tendo esta sido posteriormente analisada e acordada com o GTGeod2020.

Nesta comunicação vamos apresentar a nova configuração da Rede Geodésica Nacional para Portugal continental e as estratégias para o estabelecimento de uma nova realização do ETRS89, tendo como base o ITRF2020 (International Terrestrial Reference Frame 2020).

2. A ATUAL REDE GEODÉSICA NACIONAL (RGN)

A primeira rede geodésica nacional, cuja construção teve início no final do século XVIII e conclusão em 1888, foi estruturada com vértices geodésicos de 3 ordens, consoante a precisão das suas coordenadas. A rede de 1ª ordem foi a primeira a ser construída, constituindo um "esqueleto" ao longo de Portugal continental (Torres e Lima, 1992). A triangulação de 1ª ordem foi concluída em 1848 e a partir desta foram estabelecidas duas triangulações secundárias. A rede de 1ª ordem, ou "primordial", era constituída por 138 VG, na sua maioria materializadas por grandes pirâmides de alvenaria com 9 metros de altura, pintadas de branco com uma faixa horizontal preta (Figura 1).

Os VG de 2ª e 3ª ordens são na sua grande maioria materializados por construções do tipo "bolembreano", que consistem num tronco de cilindro encimado por um tronco de cone.

A rede de 2ª ordem era constituída por 894 vértices pintados de branco com duas faixas pretas (Figura 1) e a 3ª ordem, por sua vez, era constituída por 6988

VG pintados de branco e com apenas uma faixa preta (Figura 1). Esta rede foi sofrendo várias alterações ao longo do séc. XX, tendo a última grande intervenção ocorrido entre 1995 e 2000, em que foram recuperados cerca de 80% dos vértices da rede.



Fig. 1. Vértices Geodésicos de 1ª, 2ª e 3ª ordens.

Atualmente a RGN no continente integra 7963 vértices geodésicos, classificados em três ordens (Figura 2). A rede atual de primeira ordem tem 129 pilares observados com GNSS (na sua maioria foram observados os pilares excêntricos), com distâncias médias entre 30 a 40 km. A distância entre os vértices de segunda ordem é de cerca de 15 km e a terceira ordem é muito mais densa com um VG aproximadamente a cada 10 km.

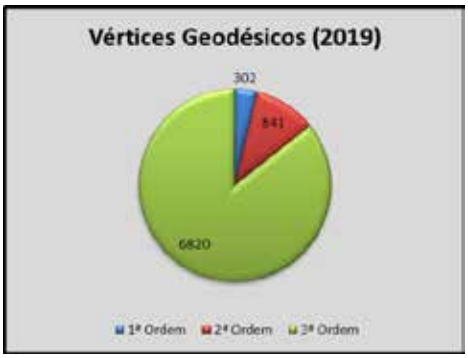


Fig. 2. Total de Vértices Geodésicos (Ano 2019).

Esta rede foi configurada no momento da constituição do Datum Lisboa e do Datum 73 que, atendendo às técnicas de observação existentes, impunha que os VG fossem colocados em locais cimeiros de forma a garantir a sua intervisibilidade. Por este motivo, existem vértices que não são estacionáveis e outros de muito difícil acesso.

2.1. Vértices geodésicos não estacionáveis

Dos 7963 vértices da atual rede geodésica para o continente, 544 não são estacionáveis, não podendo ser observados com GNSS. Na sua maioria são torres de igrejas, cataventos e pára-raios (exemplo na Figura 3) que permitem apenas a orientação das visadas realizadas nos métodos de observação ótica. Este tipo de VG encontram-se com maior incidência no litoral, tendo deixado de integrar a nova rede.



Fig. 3. VG Póvoa do Varzim (canto sudoeste do parapeito da Torre).

2.2. Vértices geodésicos observados com GNSS e transformados

O estabelecimento do ETRS89 em Portugal continental foi efetuado com base em campanhas internacionais (realizadas em 1989, 1995 e 1997), que tiveram como objetivo ligar a rede portuguesa à rede europeia. Nos anos subsequentes quase toda a rede geodésica de 1ª e 2ª ordens de Portugal continental foi observada com GPS (Global Positioning System), tendo o seu ajustamento sido realizado fixando as coordenadas dos pontos estacionados nas anteriores campanhas internacionais. Do total de vértices que constituem a RGN para Portugal continental, apenas 1814 foram observados com GNSS para a definição do ETRS89.

Os vértices geodésicos de 1ª ordem foram todos observados com GNSS. Os vértices de 2ª e 3ª ordens foram escolhidos tendo em conta a proximidade de povoações (sempre junto a sedes de municípios), com bons acessos, com boas visibilidades e estacionáveis, permitindo a utilização dos equipamentos GNSS.

Dos VG não observados com GNSS, 483 vértices obtiveram as suas coordenadas no sistema de referência ETRS89 por observação em tempo-real (RTK) e os restantes vértices por transformação de coordenadas pelo método de grelhas NTv2.0 (National Transformation version 2.0), a partir das suas coordenadas no sistema de referência Hayford-Gauss Datum 73 (HG-D73). As 182 pirâmides e respetivas excêntricas (173 da 1ª ordem e 9 da 2ª ordem), que integram a nova rede por motivos históricos e de salvaguarda do património cultural nacional, obtiveram as suas coordenadas ETRS89 igualmente por transformação pelo método de grelhas NTv2.0.

Na tabela i apresenta-se o número de vértices observados com GNSS e a respetiva percentagem, distribuídos pelas várias ordens.

Tab. i. Total de vértices geodésicos

Ordem	Observados com GNSS		Não Observados com GNSS		**Total**
	N.º VG	% do total	N.º VG	% do total	N.º VG
1ª	129	1,6	173	2,2	302
2ª	832	10,4	9	0,1	841
3ª	379	4,8	6441	80,9	6820
Total	1340	16,8	6623	83,2	7963

3. A NOVA CONFIGURAÇÃO DA REDE GEODÉSICA

3.1. Definição da nova rede geodésica

O desenvolvimento das redes de observação contínua GNSS, que permitiram uma mudança de paradigma na coordenação e elaboração de projetos nas áreas da Topografia, Geodesia, Cartografia, Informação Geográfica e Cadastro, levaram a DGT a repensar o papel da RGN para Portugal continental. Justifica-se, assim o estabelecimento de uma nova rede geodésica no território de Portugal continental com um número de VG significativamente menor.

Esta nova rede é constituída pelas 42 estações permanentes da ReNEP e por 1340 VG, 129 da atual 1ª ordem e 1211 das restantes ordens já observados com GNSS, que foram escolhidos segundo os critérios mencionados em 2.2. Incluem-se ainda na nova rede as 182 pirâmides e respetivas excêntricas da atual 1ª ordem (Figura 4).



Fig. 4. Esquema da nova rede geodésica.

A nova configuração da rede geodésica nacional tem em consideração que na atualidade o recurso aos VG ocorre fundamentalmente quando há falta de cobertura das redes GNSS ou inoperacionalidade destes serviços, falta de cobertura de rede móvel ou dificuldades temporárias nestas comunicações, necessidade de utilização dos VG como bases GNSS, para apoio mais próximo da área de trabalho, para confirmar a qualidade posicional obtida através das redes GNSS, ou ainda, para calibração ou aferição de equipamentos GNSS.

3.2. Rede geodésica auxiliar

Os vértices que não vão integrar a nova rede, mas fazem parte da atual rede, passam a integrar uma rede auxiliar enquanto apresentarem condições físicas adequadas para poderem ser utilizados. As suas coordenadas no sistema de referência ETRS89 resultam de observações GNSS em RTK ou através da transformação de coordenadas do sistema de referência HGD73.

3.3. Adoção de uma nova realização do ETRS89

Considerando que as coordenadas do sistema de referência ETRS89 entre as várias estações da ReNEP e os vértices da RGN não são homogéneas, e que decorreram 25 anos desde a campanha GPS IBERIA95, referencial ITRF97 à época 1995.4, que permitiu definir o sistema de referência ETRS89 para Portugal continental, é premente a atualização do referencial geodésico.

A nova rede permitirá estabelecer uma nova realização do sistema de referência ETRS89 tendo por base o ITRF2020, como proposto pelo GTGeod2020.

A adoção de uma nova realização do ETRS89, baseado no ITRF2020, que foi disponibilizado em abril de 2022, obriga à obtenção de novas coordenadas para as estações permanentes da ReNEP (Mendes, 2018). Posteriormente é necessário proceder ao ajustamento das coordenadas para os VG da nova rede, utilizando todas as observações GNSS que ligam os VG entre si à ReNEP e constrangendo o ajustamento à solução das estações permanentes (Vasconcelos, 2019).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A definição da nova rede é um marco fundamental para a reestruturação do referencial geodésico nacional, permitindo uma nova realização do sistema de referência ETRS89 e contribuindo para a harmonização das coordenadas da ReNEP e dos vértices geodésicos.

A compatibilidade entre as coordenadas das estações permanentes da ReNEP e os vértices geodésicos é essencial para a realização dos trabalhos que exigem maior rigor posicional, nomeadamente para as atividades relacionadas com o controlo de

deformações geodinâmicas, de monitorização de infraestruturas ou de avaliação da subida do nível médio do mar.

A definição das novas coordenadas para a nova rede, baseadas no ITRF2020, vai permitir que a harmonização da informação recolhida em Portugal com os dados obtidos a partir de outras infraestruturas europeias ocorra de forma mais funcional e rigorosa. Neste sentido, é necessário proceder ao ajustamento em bloco da rede global, incluindo a ReNEP e os VG da Rede Geodésica com vista à sua homogeneização e melhoria de precisão global das coordenadas das duas redes.

Agradecimentos

Aos elementos do Grupo de Trabalho Geodesia2020 (GTGeod2020): Carlos Antunes (Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa), João Agria Torres (Presidente do Colégio de Engenharia Geográfica da Ordem dos Engenheiros), João Catalão (Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa), Luísa Bastos (Faculdade de Ciências da Universidade do Porto), Madalena Gonçalves (Secretaria Regional de Ambiente, Recursos Naturais e Alterações Climáticas da Região Autónoma da Madeira), Marlene Antunes (Direção Regional do Ordenamento do Território e Recursos Hídricos, Divisão de Geodesia, Cartografia e Cadastro da Região Autónoma dos Açores), Paula Sanches (Instituto Hidrográfico), Rui Fernandes (Universidade da Beira Interior) e Virgílio Mendes (Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa), que apoiam a DGT efetuando estudos específicos de diagnóstico, avaliação e estratégia de suporte aos referenciais geodésicos.

REFERÊNCIAS

Mendes, V.B. (2018). Ajustamento das Coordenadas da Rede Nacional de Estações Permanentes. Relatório de execução da Cláusula 4.ª do Acordo Específico estabelecido entre a Direção-Geral do Território (DGT) e a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), em 26 de abril de 2018.

Torres, J.A., e Lima, J.N. (1992). Nova Rede Geodésica Portuguesa (NRGP). Seminário "Tendências Evolutivas da Cartografia", Lisboa, 26-27 de outubro de 1992, 81-93.

Vasconcelos, M. (2019). Estudo sobre a adopção de uma nova realização do ETRS89 em Portugal Continental. Breve descrição dos resultados preliminares. Relatório apresentado a 2 de abril de 2019.

Implementação do S-101 na Produção Cartográfica – Desafio e Impactos

A. Moura (1), P. Sanches (1), J. Vicente (1), A. Reis (1), A. Silva (1)

(1) Instituto Hidrográfico. ana.moura@hidrografico.pt

Resumo: O S-101 "ENC *Product Specification*" é a nova especificação da Organização Hidrográfica Internacional para a produção de cartas eletrónicas de navegação, baseado no modelo S-100 "IHO *Universal Hydrographic Data Model*", e reflete a necessidade da navegação marítima evoluir para um sistema dinâmico e integrado de informação geoespacial. O desenvolvimento do S-101 é atualmente da responsabilidade do *Project Team* S-101PT, integrado no grupo de trabalho S-100WG da Organização Hidrográfica Internacional, e vai suceder, e eventualmente substituir no futuro, o atual S-57 "IHO *Transfer Standard for Digital Hydrographic Data*". O Instituto Hidrográfico, enquanto entidade responsável pela produção de cartografia náutica a nível nacional, enfrentará nos próximos anos o desafio da conversão da sua cartografia eletrónica, atualmente em S-57, para S-101. Neste artigo pretende-se descrever o plano de conversão, os primeiros testes efetuados e os desafios e impactos que esta evolução terá no processo de produção cartográfica.

Palavras-chave: S-101, S-57, Carta Eletrónica de Navegação.

1. INTRODUÇÃO

O S-101 "*ENC Product Specification*" é a nova especificação da Organização Hidrográfica Internacional (IHO, na sua redação em inglês) para a produção de Cartas Eletrónicas de Navegação (ENC na sua redação em inglês), compatível com o mais recente *standard* S-100 "*IHO Universal Hydrographic Data Model*", e reflete a necessidade da navegação marítima evoluir para um sistema dinâmico e integrado de informação geoespacial. O desenvolvimento do S-101 é atualmente da responsabilidade do *Project Team* S-101PT, integrado no grupo de trabalho S-100WG da IHO, e vai suceder, e eventualmente substituir no futuro, o atual S-57 "IHO *Transfer Standard for Digital Hydrographic Data*", utilizado para a produção de ENC. O S-101 não constitui uma reformulação radical em relação ao S-57, no entanto reflete alterações ao nível da estrutura e modelo de dados de modo a beneficiar de uma estrutura mais flexível, orientado de acordo com a série 19100 das normas ISO referentes à informação geoespacial (IHO, 2021), permitindo alcançar e implementar o conceito "*e-navigation*" apresentado e regulamentado pela IMO (*International Maritime Organization*). A *e-navigation* define-se como "a recolha, integração, troca, apresentação e análise harmonizadas de informações marinhas e serviços a bordo e em terra, por meios eletrónicos, para melhorar a navegação entre portos e serviços relacionados para garantir a segurança da navegação e proteção do meio marinho". Esta evolução obriga ao envolvimento dos vários *stakeholders* do universo marítimo: institutos hidrográficos, produtores de *software*, fabricantes de ECDIS (*Electronic Chart Display Information System*), entidades reguladoras, como a IHO e a IMO, os RENC (*Regional ENC* Coordinating Centre), entidades produtoras de serviços marítimos e end-users, como navegadores, autoridades portuárias e outras partes interessadas.

Neste artigo pretende-se descrever o plano de conversão, os primeiros testes efetuados e os desafios e impactos que esta evolução terá no processo de produção cartográfica.

2. S-57 e S-101 – EM QUE DIFEREM?

O S-57 foi formalmente adotado em 1992. Implementado pela IHO para permitir a troca de informação hidrográfica entre institutos hidrográficos, fabricantes de ECDIS, navegadores e outros utilizadores, encontra-se "congelado" desde a edição 3.1 (novembro, 2000). Segundo a IHO, o S-57 tem, entre outras, as seguintes limitações (Powell, 2011):

- Regime de atualização inflexível (adição de novos objetos/atributos com sérias consequências nos produtos, serviços, *software* de produção e sistemas ECDIS);
- Não suporta as necessidades futuras dos utilizadores;
- Formatos utilizados condicionam a capacidade e a flexibilidade dos mecanismos de transferência de dados;
- Limitações em termos de *cyber* segurança;
- É considerado por muitos como um *standard* de uso exclusivo para a produção e distribuição de ENC.

Como resultado destas limitações, a IHO aprovou em 2000 uma revisão substancial do S-57, da qual resultou a criação do standard S-100. O universo do S-100 (Figura 1), do qual o S-101 é parte integrante e se apresenta como o *base map* para os outros produtos

e serviços, vai muito além das necessidades específicas das ENC, contrariamente ao que acontecia até hoje com o S-57.



Fig. 1. O universo S-100: produtos e serviços (IHO, 2021).

O S-101 terá como principais vantagens em relação ao S-57, a introdução do conceito dinâmico e evolutivo do catálogo de objetos e de visualização e simbologia, a existência de atributos complexos (agregação de atributos) e a possibilidade de codificar objetos do tipo "informação" (*nautical information*), que não têm representação espacial, e podem ser associados a outros objetos já existentes por associação (Powell, 2011). Estas características vão permitir uma maior eficiência na produção, codificação, transferência, atualização e visualização de ENC. Por exemplo, com recurso ao objeto *nautical information*, uma das alterações expectáveis na codificação S-101 é a diminuição de objetos *Caution Area* (área de precaução) muitas vezes utilizados para dar uma informação adicional ao navegador, mas criando desnecessariamente um alarme no ECDIS.

Vão existir também outras alterações ao nível do modo como a informação é codificada, nomeadamente, informação relativa à escala de compilação, o conjunto de objetos que formam *o skin of the earth*, objetos e/ou atributos que são novos ou que vão deixar de existir, a codificação de objetos *one-to-many* ou *many-to-one* relativamente aos existentes em S-57, entre outras.

Estas diferenças vão exigir um conhecimento profundo do S-101 comparativamente com a informação que existe atualmente codificada em S-57, para que se consiga garantir um processo de conversão eficiente.

3. PLANO DE CONVERSÃO DE S-57 PARA S-101

O sistema de produção cartográfica implementado no Instituto Hidrográfico (IH) é o *Hydrographic Production Database* (HPD), versão 4 (*software* proprietário da Teledyne CARIS), que corre em ambiente base dados (BD). Deste sistema fazem parte uma BD fonte e uma BD de produtos. A BD fonte contém toda a informação geográfica necessária à produção cartográfica, codificada em S-57, da qual se derivam produtos ENC e cartas náuticas em papel. Embora, tipicamente, se refira o produto ENC quando se aborda a conversão para S-101, na prática, com sistema de produção HPD, esta conversão deverá ocorrer também, na BD fonte. Existem neste momento várias abordagens possíveis para converter a informação. Pode ser efetuada, por exemplo, só ao nível dos produtos ENC ou então acontecer primeiro ao nível da BD fonte, fazendo com que os produtos sejam derivados automaticamente em S-101. Esta última hipótese é a que se pensa ser mais eficaz e se deseja implementar no IH.

O plano delineado para a conversão da cartografia de S-57 para S-101engloba as seguintes etapas:

1. Preparação dos dados S-57 existentes:
   - Definição de regras que visam a uniformização da codificação S-57;
   - Testes de conversão;
   - Definição de regras de conversão;
2. Adaptação dos dados S-57 existentes à conversão S-101;
3. Conversão de um *dataset* teste;
4. Conversão da BD fonte de S-57 para S-101;
5. Validação e controlo de qualidade da conversão;
6. Produção e distribuição de ENC S-101.

No que diz respeito ao primeiro ponto do plano, já se encontra concluída a definição de regras que visam a uniformização da codificação S-57. No entanto, estas regras têm vindo a ser aplicadas apenas às ENC publicadas mais recentemente, a partir de 2021. De 2007 (data das edições ENC mais antigas) até 2021, as ENC refletem regras de codificação variadas em consequência da sua evolução ao longo do tempo. Deste modo, é importante conhecer o universo dos dados S-57 existentes e qual é a sua qualidade e adequabilidade às regras estabelecidas para se conseguir prever, padronizar e controlar o resultado da conversão. Quanto aos testes de conversão, também foram efetuados alguns testes com conversores gratuitos, que permitem ter uma ideia inicial do resultado da conversão. Estes conversores gratuitos têm sido desenvolvidos por forma a que os produtores de ENC, os produtores de *software* e a indústria possam realizar testes para melhoria dos seus dados e produtos, e contribuir para clarificação das especificações da IHO. Estima-se que entre 80% a 90% dos dados S-57 sejam convertidos automaticamente para S-101, no entanto, e de acordo com o mencionado no capítulo anterior e os testes já realizados, sabe-se que após a conversão haverá necessidade de edição dos dados para que fiquem conformes com o S-101. Por forma a minimizar o esforço de edição existe ainda a possibilidade de definir regras de mapeamento e testes de validação personalizados, possibilitando um maior controlo durante a conversão automática.

Relativamente ao segundo ponto, adaptação dos dados S-57 à conversão, será necessário realizar mais testes de conversão, sobre um universo mais extenso de ENC, e ter um maior domínio e conhecimento do S-101, para que se possa efetuar uma avaliação mais

cuidada e serem tomadas as melhores opções. A conversão da BD fonte de S-57 para S-101 só deverá ocorrer quando as etapas mencionadas anteriormente estiverem concluídas.

Relativamente à produção e distribuição de ENC S-101, embora hajam diversas possibilidades durante o período de transição, no que se refere a garantir no mercado produtos em ambos os formatos S-57 e S-101 (*dual-fuel period*), e ainda não haja uma posição clara do IH quanto a garantir uma produção focada apenas em S-101 ou uma produção paralela em S-57 e S-101, a opção que se encontra em discussão é o IH disponibilizar ao *International Centre for Electronic Navigational Charts* (IC-ENC), *Regional ENC Coordinating Centre* (RENC) adotado pelo IH, apenas ENC S-101 e o IC-ENC ficar responsável pela conversão de S-101 para S-57, de acordo com regras acordadas entre as partes, de modo a garantir a distribuição de ENC S-57 e S-101 durante o período transição.

O plano delineado para a implementação e operacionalização da produção em S-101 no IH está dependente de vários intervenientes, nomeadamente, de decisões tomadas pela IMO no que diz respeito à adoção de equipamentos ECDIS *dual-fuel*, dos próprios fabricantes de ECDIS, e mais diretamente, dos prazos da IHO para a disponibilização e implementação da nova edição do S-101 (Figura 2).



Fig. 2. Fita de tempo proposta para a conversão de S-57 para S-101 no IH (adaptação do documento da IHO (IHO, 2021)).

A IHO espera que os serviços hidrográficos (SH) estejam em condições de iniciar a produção em 2024. No IH prevê-se que as primeiras ENC S-101 sejam produzidas ainda em 2024, e que a produção em S-101 do ponto de vista operacional se inicie em 2025, após conversão e validação da BD fonte.

7. PRIMEIROS TESTES DE CONVERSÃO REALIZADOS

Os primeiros testes foram realizados com recurso a dois conversores: o "S-101 *Converter* 1.0.0.20", desenvolvido pela empresa ESRI no âmbito de um projeto conjunto com a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), e disponibilizado no âmbito do WG S-100 da IHO, e o "DKart S-101 *Converter* 1.0.0" disponibilizado pela empresa i4Insight. A informação foi visualizada também em duas aplicações diferentes: um visualizador gratuito desenvolvido pela *Korea Hydrographic and Oceanographic Agency* (KHOA) e o visualizador "CARIS Easyview" disponibilizado gratuitamente pela Teledyne CARIS. Os resultados obtidos pelos dois conversores são, na sua generalidade semelhantes, havendo, no entanto, algumas diferenças que podem ser justificadas pela data em que os conversores foram desenvolvidos e pela maturidade das especificações existentes na altura. Dos testes de conversão efetuados, o objeto S-57 M_QUAL (*Quality of Bathymetric Data*) é um dos que apresenta maior número de alterações significativas quando convertidos para S-101, obrigando a um controlo de qualidade mais cuidado (ver tabela i).

Tab.. i. Principais diferenças entre o objeto S-57 M_QUAL e o correspondente objeto S-101 Quality of Bathymetric Data.

S-57	S-101
Objeto: M_QUAL	Objeto: *Quality of Bathymetric Data*
Atributo: CATZOC (mandatório)	CATZOC desconstruído nas suas diversas componentes dando origem a vários atributos: - *Horizontal and vertical uncertainty*; - *Data assessment*; - *Temporal variation*; - *Features detected*; - *Full seafloor coverage achieved*. (atributos mandatórios)
Atributo: SUREND (não mandatório)	Atributo: *Survey Data Range*, sub-atributo *Data End* (mandatório)
Atributo: TECSOU	Proibido para o objeto *Quality of Bathymetric Data*. Em alternativa pode ser criado um objeto *Quality of Survey*.
Atributo: INFORM	Convertido para o objeto *Nautical Information*, sem representação espacial.

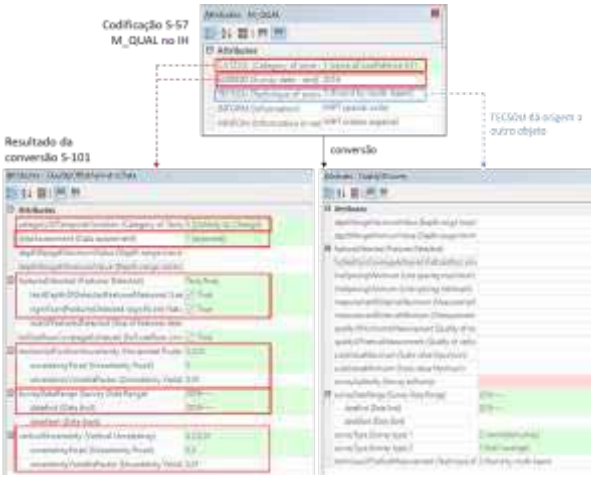


Fig. 3. Resultado da conversão automática do objeto S-57 M_QUAL para a respetiva representação em S-101.

Pela análise da tabela i e da figura 3 é fácil perceber a complexidade dos atributos em S-101, quando comparados com o S-57. Neste caso, na produção do IH, o objeto S-57 M_QUAL fica perfeitamente definido com cinco atributos. Em S-101, o mesmo objeto deu origem a dois objetos distintos, com dezoito atributos preenchidos. O atributo S-57

CATZOC é transformado em diversos atributos que são preenchidos automaticamente com base nos valores apresentados na tabela *Zone of Confidence* (ZOC) incluída na especificação "S-57 *Appendix A, Chapter 2 – Attributes*. Apesar da conversão ter sido automática, é necessário efetuar um controlo de qualidade rigoroso, principalmente no que diz respeito às incertezas horizontais e verticais adotadas, à variação temporal e à deteção de objetos. Como resultado dos testes de conversão verificou-se também que, por vezes, objetos em S-101 tem novos atributos obrigatórios, que não têm correspondência com nenhum atributo S-57, alguns atributos em S-57, aparentemente, perdem-se e a conversão do objeto S-57 BRIDGE (pontes) não é automática, entre outros.

Estes testes de conversão permitem fazer uma primeira análise da qualidade da conversão e realizar estudos quando à adequabilidade da informação S-57 existente, no entanto, ressalva-se que a conversão final será realizada com o conversor desenvolvido pela Teledyne CARIS, integrado no sistema HPD.

8. DESAFIOS E IMPACTOS

O primeiro grande desafio centra-se na necessidade de construção de conhecimento sobre a especificação S-101, que terá de ser feita internamente por cada SH. Será necessário garantir a formação em S-101 dos recursos humanos afetos à produção cartográfica e também definir e estabelecer novas regras e normas internas que reflitam o novo *standard*. Embora não haja uma rutura com o atual S-57, as alterações existentes e os anos de experiência a produzir com base noutro *standard*, implicam necessariamente um período temporal de adaptação. Só depois de se adquirir este conhecimento se poderá garantir que o processo de conversão e controlo de qualidade dos dados S-101 ocorre da forma mais eficiente e com o menor impacto na produção cartográfica.

Sabe-se também que, de acordo com as discussões no âmbito dos grupos de trabalho da IHO, é esperada uma reformulação nos esquemas de cobertura ENC a nível mundial, retirando-lhes a direta correspondência com a cartografia em papel existente, trazendo a necessidade de criar novas ENCs, alterando limites e reestruturando o esquema de numeração. Isto implicará uma revisão total do fólio cartográfico nacional e terá impacto direto na estrutura e organização da BD fonte HPD.

No que diz respeito aos impactos financeiros, é esperado que vão além da necessária alocação de verbas para aquisição de novas licenças para os *softwares* de produção e controlo de qualidade utilizados. O esforço para converter a cartografia, quer em termos temporais, quer em termos de recursos humanos, continuando simultaneamente a dar resposta às necessidades da produção cartográfica, implicarão também um aumento no impacto financeiro.

9. CONCLUSÕES

A transição de S-57 para S-101 é um reflexo da evolução tecnológica e da necessidade de a navegação marítima evoluir para um sistema dinâmico e integrado de informação marítima geoespacial. Esta alteração terá um impacto direto na produção cartográfica do IH, e implicará a conversão de toda a informação cartográfica representada em S-57 para S-101. Durante este processo de transição é necessário garantir a formação dos recursos humanos, e alocar tempo de investigação e de uniformização da atual informação S-57, para se garantir que o processo ocorre da forma mais eficiente e com o menor impacto possível na produção cartográfica.

Dos testes já realizados sabe-se que a conversão não vai ser totalmente automática, pode-se tornar bastante complexa para alguns objetos, e vai exigir alguma edição manual e um controlo de qualidade adequado.

Em termos de produção S-101 estima-se que o IH reúna condições para produzir as suas primeiras células em 2024 e que a produção cartográfica, do ponto de vista operacional, ocorra em 2025. Os prazos definidos podem sofrer alterações, em função de diversos fatores, nomeadamente, da capacidade de disponibilização dos *softwares* de produção, dos fabricantes de ECDIS e de decisões tomadas pela IMO enquanto entidade reguladora e responsável pela segurança navegação marítima.

REFERÊNCIAS

ESRI. S-101 Converter 1.0.0.20, acedido em https://www.arcgis.com/home/item.html?id=167224245f0e4c6daeb33b979e90b3fa

IHO (2022). S-57 ENC to S-101 Conversion Guidance, Annex B, Draft Edition 0.0.2.20220321.

IHO (2021). Roadmap for the S-100 Implementation Decade (2020-2030), Annex 2, Version 1.0, Rev. 1.

IHO (2021). S-101 Value Added Roadmap, draft version.

IHO Publication S-101 (2018). IHO Electronic Navigational Chart Product Specification, Edition 1.0.0.

I4Insight. DKart S-101 Converter 1.0.0, acedido em https://files.i4-insight.com/url/S101converter

Powell, J. (2011). The New Electronic Chart Product Specification S-101: An Overview. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportations*, Volume 5, Number 2.

Teledyne CARIS. Caris Easy View 5.5.19, acedido em https://www.teledynecaris.com/en/products/easy-view/

Identificação de áreas de risco para a segurança da navegação no porto de Lisboa, para priorização e planeamento de levantamentos hidrográficos

T. Dias (1), A. Nunes (2), L. Veiga (1)

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

(2) Marinha. ana.catarina.nunes@marinha.pt.

Resumo: A relevância das cartas náuticas (CN) para a segurança da navegação depende da fiabilidade da sua informação. A realidade que representam é dinâmica, sendo necessário adquirir, periodicamente, novos dados, mediante levantamentos hidrográficos (LH). A priorização das áreas críticas para a segurança da navegação e a definição da qualidade e frequência dos LH são cruciais na gestão hidrográfica. Este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo de apoio à gestão hidrográfica, aplicado ao caso de estudo do porto de Lisboa. A análise geoespacial baseou-se na informação das CN publicadas e dos LH realizados pelo Instituto Hidrográfico e em dados *Automatic Identification System*. Verificou-se que, genericamente, os LH têm melhor qualidade e frequência e as CN têm informação de melhor confiança nas áreas que apresentam maior risco para a segurança da navegação, identificando-se algumas áreas onde se recomendam alterações na qualidade e frequência dos LH e atualizações da informação das CN.

Palavras-chave: apoio à decisão, carta náutica, levantamento hidrográfico, porto de Lisboa, segurança da navegação.

1. INTRODUÇÃO

As cartas náuticas (CN) são essenciais para os navegantes e para a segurança da navegação (NOAA, 2021). A informação que apresentam pode ter várias procedências (Russom & Halliwell, 1978), incluindo diferentes técnicas e datas de aquisição (Prince, 2017), sendo classificada em função da sua confiança (OHI, 2020a) (OHI, 2020b) e qualidade (Weintrit, 2018).

A realidade representada nas CN não permanece estática, podendo-se verificar alterações: (i) naturais, relacionadas com a dinâmica do fundo e da coluna de água (e.g., correntes); (ii) artificiais, relacionadas com obras marítimas (e.g., dragagens); (iii) metodológicas, associadas à evolução das técnicas de aquisição de dados (e.g., LiDAR); e (iv) de finalidade, associadas à prática de novas rotas, por exemplo, decorrente do incremento da dimensão dos navios e da densidade do tráfego marítimo.

Estas constantes alterações tornam as CN desatualizadas, diminuindo a sua importância para a segurança da navegação e, potencialmente, contribuindo para acidentes marítimos (OHI, 2018). Assim, a execução de levantamentos hidrográficos (LH), em áreas específicas e com determinada qualidade e frequência, é fundamental para que as CN se mantenham atualizadas e relevantes. No entanto, a assimetria entre os recursos humanos e materiais disponíveis e a extensão das áreas a sondar, faz com que seja necessária uma priorização prévia, das áreas consideradas críticas para a segurança da navegação.

Este trabalho procurou investigar a seguinte questão central (QC): "será que os LH têm melhor qualidade e frequência e as CN têm informação de melhor confiança nas áreas que, efetivamente, representam possíveis perigos para a segurança da navegação?" Desta forma, foi possível descobrir e evidenciar informação espacial relevante, contribuindo para um eventual modelo de análise e apoio à decisão na gestão hidrográfica, aplicado ao caso de estudo do porto de Lisboa.

2. MÉTODOS E MATERIAIS

A priorização de LH e a análise de risco hidrográfico não constituem uma novidade para as entidades produtoras de CN, de que é exemplo o Instituto Hidrográfico (IH). O desenvolvimento destas metodologias esteve associado, inicialmente, à álgebra de mapas (Tomlin, 1990) e, atualmente, à análise multicritério e sistemas de apoio à decisão integrados em sistemas de informação geográfica (GIS-MCDA[1]) (Malczewski, 2006).

O primeiro plano hidrográfico foi criado pela *National Oceanic and Atmospheric Administration*, tendo sido atualizado pela última vez em 2012 (NOAA, 2012). Posteriormente, evoluiu para um novo modelo (*hydrographic health*) baseado na análise de risco (NOAA, 2017), nomeadamente, no método GIS-

[1] Sigla em inglês: *Geographic Information Systems Multi-Criteria Decision Analysis*.

MCDA, e considerando diversos fatores: desigualdade entre a qualidade e confiança pretendidas para os dados batimétricos, face à realidade (*hydrographic gap*); probabilidade dos riscos (densidade de tráfego marítimo, intervalos de profundidade, incerteza da informação batimétrica, proximidade de perigos, frequência e relato de acidentes marítimos); impacto dos riscos (distância a meios de socorro e de intervenção, proximidade de áreas protegidas ou de infraestruturas de interesse) (Keown, et al., 2016). Recentemente, outras entidades congéneres criaram ferramentas análogas, nomeadamente o *Canadian Hydrographic Service* (Chénier, et al., 2018) e o *Land Information New Zealand* (LINZ, 2020), destacando a sua relevância no apoio à decisão e no pensamento baseado em risco, um dos princípios de gestão da qualidade (IPQ, 2015).

Outros desenvolvimentos deste tema, mais dirigidos para a segurança da navegação e focados na área específica do porto de Lisboa, incidiram sobre a análise dos padrões de tráfego marítimo (Sulemane, 2015).

Neste trabalho é proposta uma abordagem inovadora, considerando o princípio fundamental de que a qualidade dos LH (ordem) (OHI, 2020a) deve ser adequada aos requisitos de segurança da navegação da área, normalmente relacionados com o resguardo mínimo do navio ao fundo (*underkeel clearance*[2]) (OHI, 2020a). Assim, analisando os padrões de trânsito dos navios (obtidos a partir das respetivas *tracklines*), especificamente no porto de Lisboa, identificaram-se as áreas onde o respetivo resguardo ao fundo era mínimo, comparando-as com as áreas de maior qualidade, frequência e confiança da informação batimétrica. A metodologia adotada baseou-se no método analítico geoespacial estruturado (SGAM[3]) (Bacastow, et al., 2010).

Na orientação da pesquisa, foram consideradas as seguintes hipóteses:

- H1 – As áreas das CN com melhor confiança (CATZOC[4]) (OHI, 2020b) na informação batimétrica correspondem às zonas onde os navios registam menor resguardo ao fundo e o tráfego marítimo apresenta maior densidade;
- H2 – As áreas dos LH com melhor qualidade (ordem) (OHI, 2020a) e maior frequência correspondem às zonas onde os navios registam menor resguardo ao fundo e o tráfego marítimo apresenta maior densidade.

2.1. *Área de estudo*

A área de estudo deste trabalho localiza-se no porto de Lisboa, entre o passo da barra sul e a ponte 25 de abril, conforme ilustrado na Fig. 1.

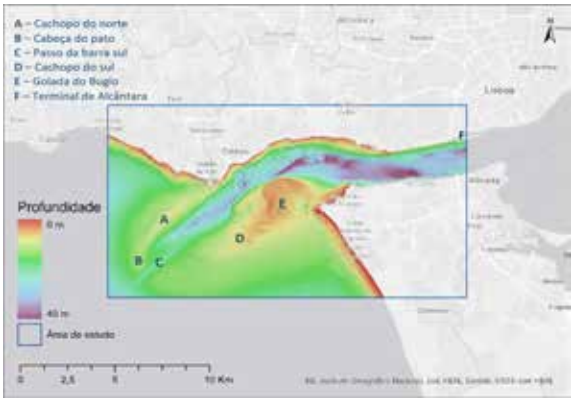


Fig. 1. Área de estudo, com destaque de algumas zonas (A a E).

2.2. *Fontes de dados*

Foram recolhidos, pré-processados e utilizados os seguintes dados:

- Modelo batimétrico do porto de Lisboa, com resolução de 25 m (*GeoTIFF*) (IH, 2021);
- LH realizados no porto de Lisboa, pelo IH, entre 1955 e 2019 (*Esri Shapefile*) (IH, 2019);
- Carta eletrónica de navegação (CEN) PT526303 (*Esri Shapefile*) (IH, 2020a);
- CEN PT526304 (*Esri Shapefile*) (IH, 2020b);
- Dados *Automatic Identification System* (AIS) de navios no porto de Lisboa, referentes ao período de 18 a 21 de abril de 2021[5] (*Esri Shapefile*) (MSSIS & SAT-AIS, 2021).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No pré-processamento dos dados foram detetadas algumas inconsistências nas fontes, nomeadamente, nas bases de dados dos LH (e.g., registos não atómicos e atributos errados) e do AIS (registos nulos); que foram ultrapassadas através da correção (quando possível) e eliminação dos respetivos registos.

Na fusão da informação, destacam-se as seguintes comparações:

- Entre a CATZOC A1 das CEN e as ordens especial e 1A dos LH (Fig. 2). Esta comparação permitiu detetar um desfasamento, indicativo de que a informação constante nas CEN não se encontra atualizada com os LH mais recentes. Isto pode acontecer quando a nova informação batimétrica (LH) não é substancialmente diferente da publicada (CEN), não exigindo uma atualização imediata. No entanto, apesar de poderem não existir diferenças batimétricas que afetem significativamente a segurança da navegação, considera-se que a atualização da categoria de confiança da informação constitui um dado útil para o navegador, pelo que se recomenda a respetiva atualização;

[2] Distância mínima entre o ponto inferior da quilha do navio e o fundo do mar.
[3] Sigla em inglês: *Structured Geospatial Analytic Method*.
[4] Sigla em inglês: *Category Zone of Confidence*.
[5] O período foi restringido a quatro dias, considerando os dados disponíveis e a capacidade de processamento do computador utilizado. Neste sentido, embora limitados, os resultados são representativos e demonstrativos da eficácia do modelo de análise.

– Entre a CATZOC A1 das CEN, o resguardo ao fundo (Fig. 3) e a densidade do tráfego (Fig. 4). Esta comparação permitiu validar a H1. Contudo, identificaram-se algumas zonas onde se recomenda a extensão da CATZOC A1, de modo a adequar-se aos requisitos da navegação real, nomeadamente, a oeste do passo da barra sul, junto à cabeça do pato, e a noroeste da golada do Bugio;
– Entre as ordens especial e 1A dos LH, a frequência de LH, o resguardo ao fundo (Fig. 5) e a densidade do tráfego (Fig. 6). Esta comparação permitiu validar a H2. Porém, identificaram-se determinadas zonas onde se recomenda a extensão dos LH de ordem 1A (ou superior) (a oeste do passo da barra sul, junto à cabeça do pato, e a noroeste da golada do Bugio) e a respetiva frequência (a oeste do passo da barra sul, junto à cabeça do pato, e em redor do terminal de Alcântara).

Neste trabalho apenas foram utilizados dados de LH realizados pelo IH[6]. No entanto, a título de exemplo, no terminal de Alcântara, a Administração do Porto de Lisboa (APL) realiza LH frequentemente, recomendando-se que, na ausência de dados próprios, a informação de terceiros, devidamente validada, seja incluída nas CN.

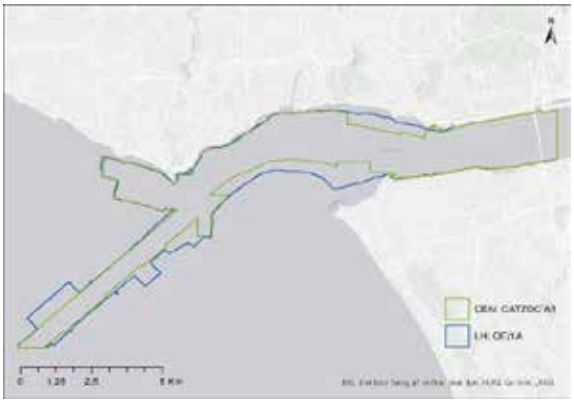


Fig. 2. Desfasamento entre CATZOC A1 e ordens especial e 1A.

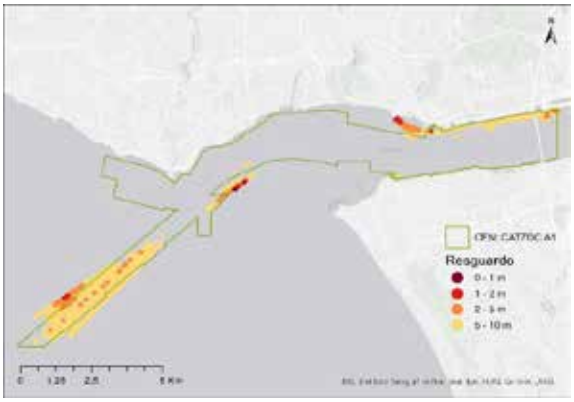


Fig. 3. Sobreposição da CATZOC A1 com o resguardo ao fundo.

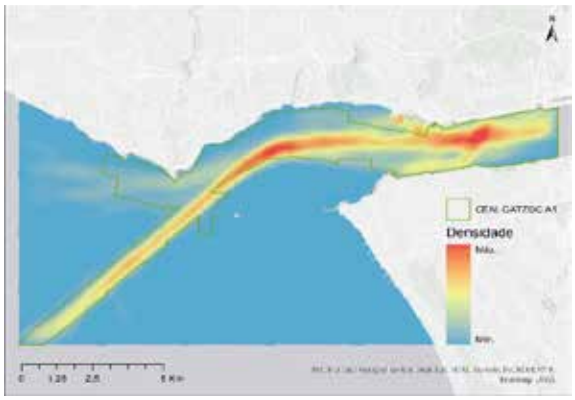


Fig. 4. Sobreposição da CATZOC A1 com a densidade do tráfego.

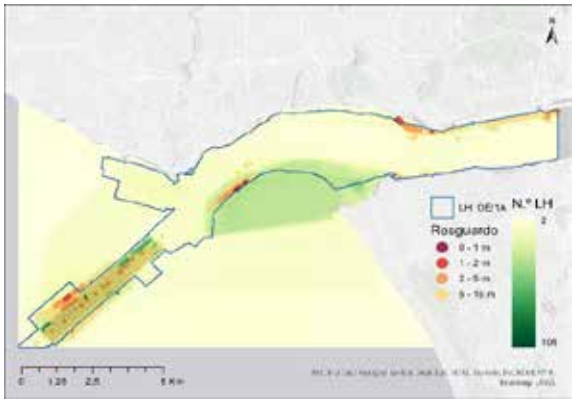


Fig. 5. Sobreposição das ordens especial e 1A e da densidade de LH com o resguardo ao fundo.

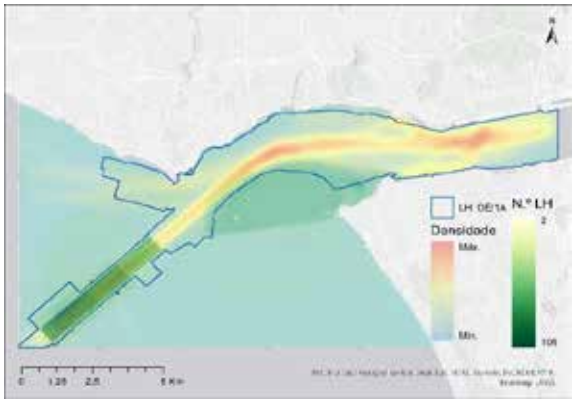


Fig. 6. Sobreposição das ordens especial e 1A e da densidade de LH com a densidade do tráfego.

4. CONCLUSÃO

A análise da QC permitiu concluir que, de um modo geral, no porto de Lisboa, os LH têm melhor qualidade e frequência e as CEN têm informação de melhor confiança nas áreas onde, na realidade, os navios navegam com menor resguardo ao fundo e maior densidade de tráfego. Não obstante, foram identificadas algumas oportunidades de melhoria na gestão hidrográfica, tecendo-se as seguintes recomendações:

– As áreas de execução de LH de ordem 1A ou superior devem ser estendidas a oeste do passo da

[6] Em algumas destas áreas (cachopo do norte, cabeça do pato, passo da barra sul, golada do Bugio) os LH têm sido realizados anualmente, pelo IH, ao abrigo do contrato interadministrativo com a APL.

barra sul, junto à cabeça do pato, e a noroeste da golada do Bugio;
- A frequência de execução de LH de ordem 1A ou superior deve ser ampliada a oeste do passo da barra sul, junto à cabeça do pato, a noroeste da golada do Bugio e em redor do terminal de Alcântara.

Referem-se como linhas de ação futuras:
- Implementar soluções automatizadas de pré-processamento dos dados provenientes das CEN, dos LH e do AIS;
- Integrar a informação da maré no cálculo do resguardo mínimo dos navios ao fundo e estender a análise a outros fatores (e.g., complexidade do fundo);
- Implementar o modelo de análise noutros portos.

REFERÊNCIAS

Bacastow, T. S., Bellafiore, D., Bridges, D. & Harter, S., 2010. *The Learner's Guide to Geospatial Analysis.* [Online] Disponível em: https://www.e-education.psu.edu/sgam/ [Acedido em 28 abril 2021].

Chénier, R., Abado, L. & Martin, H., 2018. CHS Priority Planning Tool (CPPT) - A GIS Model for Defining Hydrographic Survey and Charting Priorities. *ISPRS - International Journal of Geo-Information,* Volume 7, 240.

IH, 2019. *Levantamentos hidrográficos realizados no porto de Lisboa entre 1955 e 2019.* Lisboa: Instituto Hidrográfico.

IH, 2020a. *PT526303 - Baía de Cascais e Barras do Rio Tejo (Porto de Lisboa).* Lisboa: Instituto Hidrográfico.

IH, 2020b. *PT526304 - Porto de Lisboa (Ribeiro do Jamor ao Terreiro do Trigo).* Lisboa: Instituto Hidrográfico.

IH, 2021. *Modelo Batimétrico do porto de Lisboa.* Lisboa: Instituto Hidrográfico.

IPQ, 2015. *Norma Portuguesa - Sistemas de Gestão da Qualidade - Requisitos (ISO 9001:2015).* 4.ª ed. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

Keown, P. et al., 2016. *A Risk-Based Approach to Determine Hydrographic Survey Priorities Using GIS.* [Online] Disponível em: https://proceedings.esri.com/library/userconf/oceans16/papers/oceans_02.pdf [Acedido em 28 abril 2021].

LINZ, 2020. *New Zealand Hydrographic Risk Assessments.* [Online] Disponível em: https://www.linz.govt.nz/sea/charts/annual-work-programme/new-zealand-hydrographic-risk-assessments [Acedido em 28 abril 2021].

Malczewski, J., 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science,* Volume 20 (7), pp. 703-726.

MSSIS & SAT-AIS, 2021. *Dados Automatic Identification System (AIS) - Maritime Safety and Security Information System (MSSIS) e Satellite AIS (SAT-AIS).* Lisboa: MSSIS & SAT-AIS.

NOAA, 2012. *NOAA Hydrographic Survey Priorities.* [Online] Disponível em: https://nauticalcharts.noaa.gov/publications/docs/national-hydrographic-survey-priorities/nhsp-text-2012.pdf [Acedido em 28 abril 2021].

NOAA, 2017. *National Hydrographic Survey Priorities.* [Online] Disponível em: https://nauticalcharts.noaa.gov/publications/national-hydrographic-survey-priorities.html [Acedido em 28 abril 2021].

NOAA, 2021. *What is a nautical chart?.* [Online] Disponível em: https://oceanservice.noaa.gov/facts/nautical_chart.html [Acedido em 28 abril 2021].

OHI, 2018. *S-4 - Regulations of the IHO for International (INT) Charts and Chart Specifications of the IHO.* 4.8.0 ed. Mónaco: Organização Hidrográfica Internacional.

OHI, 2020a. *S-44 - IHO Standards for Hydrographic Surveys.* 6th ed. Mónaco: Organização Hidrográfica Internacional.

OHI, 2020b. *S-67 - Mariner's Guide to Accuracy of Depth Information in Electronic Navigational Charts (ENC).* 1.0.0 ed. Mónaco: Organização Hidrográfica Internacional.

Prince, M., 2017. *Accuracy and reliability of charts.* [Online] Disponível em: https://www.hydro.gov.au/prodserv/important-info/accuracy_and_reliability_of_charts.pdf [Acedido em 28 abril 2021].

Russom, D. & Halliwell, H. R. W., 1978. Some basic principles in the compilation of nautical charts. *International Hydrographic Review,* Volume LV (2), pp. 11-19.

Sulemane, C., 2015. *Ferramentas para a Análise dos Padrões de Tráfego da Barra Sul do Porto de Lisboa - Análise de Risco.* Alfeite: Escola Naval.

Tomlin, C. D., 1990. *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling.* Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Weintrit, A., 2018. Reliability of navigational charts and confidence in the bathymetric data presented. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin,* Volume 54 (126), pp. 84-92.

S-100 – Situação atual. Desafios futuros

P. Sanches (1), J. Vicente (1), P. Nunes (1)

(1) Instituto Hidrográfico. paula.sanches@hidrografico.pt

Resumo: O S-100 *Universal Hydrographic Data Model* como novo *standard*, fornece a estrutura a partir da qual especificações de produtos podem ser desenvolvidas para uso em sistemas de navegação e infraestruturas de dados espaciais marinhos. Suporta uma ampla variedade de dados hidrográficos e permitirá a integração e o desenvolvimento de produtos e serviços digitais para as comunidades hidrográfica, marítima e de Sistemas de Informação Geográfica. A adaptação à era digital, em particular à era S-100, faz antever a sua progressiva adoção, em particular como novo *standard* para navegação marítima, pelo que, o Instituto Hidrográfico tem acompanhado o seu desenvolvimento, com vista à implementação, nas suas áreas de responsabilidade, de acordo com as recomendações internacionais, destacando-se a futura Carta Eletrónica de Navegação, "S-101ENC", componente essencial para o conceito "E-navigation". A presente comunicação, pretende dar a conhecer a situação atual, as pretensões futuras e os desafios decorrentes da sua implementação na década 2020-2030.

Palavras-chave: cartografia, cartas náuticas, *E-navigation*, infraestrutura de dados marinhos, produtos de navegação.

1. INTRODUÇÃO

A Organização Hidrográfica Internacional (OHI), da qual Portugal é Estado membro fundador, é uma organização intergovernamental estabelecida em 1921, para apoiar a segurança da navegação e a proteção do meio marinho. Como organização técnico-consultiva tem por objetivo, entre outros, o estabelecimento e manutenção de normas (*standards)* para a utilização de dados e informação hidrográfica.

A abordagem tradicional aos dados hidrográficos tem tido como foco primário os navegantes e os produtos como as cartas náuticas e eletrónicas e as publicações náuticas em cumprimento da convenção SOLAS[1] e segundo os normativos e recomendações da OHI.

A abordagem futura apoia-se no servir todas as partes interessadas e na existência de variados conjuntos de dados promovendo produtos diversificados.

Dentro das suas competências, a OHI deu início ao desenvolvimento de um novo *standard* designado por S-100 *IHO Universal Hydrographic Data Model*, decorrente da necessidade da revisão do atual S-57 e no sentido de, por um lado, evitar confusão entre o S-57 "*Transfer Standard for Digital Hidrographic Data*" e o *ENC Product Specification*, e, por outro, ultrapassar as suas limitações, nomeadamente as relativas ao suporte e inclusão de dados adicionais como são exemplo, a batimetria de alta resolução ou dados variáveis em tempo, como o nível das águas do mar. Esta norma tem por objetivo dar suporte aos mais variados conjuntos de dados hidrográficos indo para além do seu uso tradicional, sendo um dos exemplos a futura aplicabilidade às mais recentes infraestruturas de dados marinhos (*Marine Spatial Data Infrastructure* (MSDI))[2].

De entre as prioridades da OHI, para além do desenvolvimento e implementação do S-100, estão, o suporte à implementação do conceito *E-navigation*[3], o MSDI e a disponibilização de geodata.

O Instituto Hidrográfico (IH), no âmbito das suas competências como Serviço Hidrográfico Nacional e como Laboratório de Estado tem vindo a acompanhar a evolução do S-100, no sentido de poder implementar, em tempo, as recomendações definidas pelo OHI nesta matéria.

2. S-100

O S-100 providencia uma norma para dados hidrográficos geoespaciais em alinhamento com a série de normas para a Informação Geográfica, ISO 19100, por forma a fornecer a estrutura a partir do qual as especificações de produtos podem ser desenvolvidas para uso em sistemas de navegação e em MSDI, potenciando o fornecimento de produtos digitais e eletrónicos, cartas de navegação,

[1] SOLAS - *Safety of Life at Sea Convention.* (Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar).

[2] SDI *is "the relevant base collection of technologies, policies and institutional arrangements that facilitate the availability of and access to spatial data". Ref: Global Spatial Data Infrastructure (GSDI) Cookbook (OHI, C-17, second Edition, versión 2.0.0-January 2017). MSDI is the component of an SDI that focuses on the marine input in terms of governance, standards, ICT and conten t(OHI, C-17, second Edition, versión 2.0.0-January 2017).*

[3] https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/eNavigation.aspx

publicações náuticas, entre outros produtos relacionados com *E-navigation*[4] e Serviços.

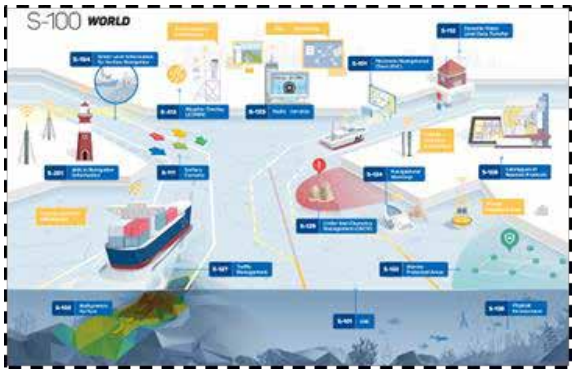


Fig. 1. S-100 Universal Hydrographic Data Model (Fonte: International Hydrographic Organization)

Espera-se que venha a substituir as normas existentes por uma nova estrutura que permitirá o desenvolvimento da Carta Eletrónica de Navegação (ENC no seu acrónimo em Inglês)[5] de última geração assim como de outros produtos de valor. Incorporará requisitos para compilar e visualizar dados de ENC e estabelecerá as bases para novas aplicações que vão para além do domínio da hidrografia tradicional.



Fig. 2. Aplicações.

Ao suportar uma ampla variedade de dados hidrográficos permitirá a integração e o desenvolvimento de produtos e serviços digitais para as comunidades hidrográfica, marítima e de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (OHI, 2020).

O desenvolvimento do conceito S-100 iniciou-se em 2005 com o objetivo de, permitir a interoperabilidade entre uma grande variedade de dados geoespaciais marinhos e também de colmatar as deficiências dos produtos cartográficos náuticos digitais. A primeira edição foi publicada em janeiro de 2010 como norma internacional para a era da informação geoespacial marinha, tendo sofrido até à data várias revisões, estando em processo de aprovação, pelo HSSC (comité da OHI para os Serviços Hidrográficos e *Standards)*, para publicação em 2022, a edição 5.0.0, considerada como versão operacional (Fig. 3.).

1	Conceptual Schema Language	9	Portrayal
2	Management of IHO Geospatial Information Registers	10	Encoding Formats
3	General Feature Model and Rules for Application Schema	11	Product Specifications
4	Metadata	12	S-100 Maintenance Procedures
5	Feature Catalogue	13	S-100 Scripting Language
6	Coordinate Reference Systems	14	Online Communication Exchange
7	Spatial Schema	15	Encryption and Data Protection
8	Imagery and Gridded Data		

Fig. 3. Partes constituintes da norma S-100

2.1. *Produtos e Serviços versus domínios*

São várias as organizações internacionais que colaboram ativamente com a OHI, nas suas áreas de atuação, através do desenvolvimento de especificações de produtos baseados no S-100, (*IHO S-100 based Product Specification*), cujos domínios de utilização estão expressos na Fig. 4. No sentido de minimizar a duplicação e encorajar a conformidade, as especificações de produto, têm uma numeração dedicada atribuída pelo HSSC (Fig. 4.)



Fig. 4. Organizações versus Especificações de Produtos.

Dentro da estrutura da OHI e sob a alçada do comité HSSC, está definido o grupo de trabalho, no qual o IH está representado, S-100WG, responsável pela manutenção e desenvolvimento da infraestrutura S-100, atualmente presidido pelos Estados Unidos da América (USA). Dentro deste grupo de trabalho foram constituídas várias equipas de projeto para o desenvolvimento de produtos específicos como são exemplo o S-101PT para o desenvolvimento da norma relativa às ENC, *S-101 Electronic Navigational Chart Product Specification* e o S-102PT para desenvolvimento da norma relativa às superfícies batimétricas, *S-102 Bathymetric Surface Product Specification*, entre outros.

2.2. *Implementação do S-100*

À data está estabelecido um plano para implementação do S-100, expresso num documento designado por *Roadmap for the S-100*

[4] Definido (IMO) como a recolha, integração, troca, apresentação e análise harmonizadas da informação marinha, por meios eletrónicos, tanto a bordo como em terra, para melhorar a navegação e serviços relacionados, para a segurança e proteção no mar e para proteção do ambiente marinho.

[5] ENC (no seu acrónimo em inglês) – significa uma *Base de Dados padronizada em conteúdo, estrutura e formato* para utilização num ECDIS *(Electronic Chart Display and Information System)*, publicada sob autoridade de um governo, serviço hidrográfico ou outra instituição governamental (Resolução IMO MSC232(82), Anexo24)

Implementation Decade (2020-2030) v.2.0 (IHO, 2021), disponível em https://iho.int/en/s-100-implementation-strategy , com o objetivo de regular e harmonizar a produção e a disseminação de produtos de base S-100. Naquele documento são analisadas várias vertentes como: Infraestrutura Operacional; Normas Técnicas; Coordenação na Implementação de Serviços; Sincronização com a IMO (*International Maritime Organization*); Colaboração com a Industria; Edificação de Capacidades nos Serviços Hidrográficos e Desenvolvimento de Capacidade Global de Distribuição, assim como estabelecidos: uma fase de transição até 2030, os detalhes relativos a prioridades e fitas de tempo, opções de produção pelos Serviços Hidrográficos (HOs) e a colaboração com a IMO. Neste contexto, foi também estabelecida a versão 1.0 dos Princípios WEND (*Worldwide Eletronic Navigational chart Database*) para os produtos S-1XX (*WEND-100 Principles*).

No sentido de corresponder, aquela que se considera, a designada fase de transição (até 2030), tanto no que respeita à produção como à distribuição de produtos e serviços e, tendo por principio que as ENC são o produto base para o conceito *E-navigation*, os Estados Membros da OHI têm sido desafiados a se preparem para dar inicio à regular produção de S-101 ENC em 2025 e os RENC (*Regional ENC Coordinating Centre*) a estarem em condições de alimentar o mercado.

À medida que a navegação eletrónica se torna mais difundida, os navegantes têm ao dispor dados marítimos de várias fontes. Face ao aumento da quantidade de informação e número de fontes, para que os dados possam ser facilmente integrados e exibidos adequadamente, torna-se essencial existirem sob a mesma estrutura normativa. O S-100 usa catálogos legíveis pelos ECDIS[6] que levarão a sistemas de harmonização e interoperabilidade, e permitirão uma atualização mais fácil de dados.

Embora a implementação em larga escala dos produtos S-100 dependa do desenvolvimento oportuno de várias especificações e estruturas para um ECDIS homologado, espera-se que, à medida que avançamos na década, o S-100 se torne na norma em utilização.

2.3. Prioridades na Implementação do S-100

Sendo as ENC, por principio, o produto base, a especificação S-101 foi considerada prioritária, ao qual se associou um conjunto de outras especificações, alocadas à OHI.

A interoperabilidade entre as diferentes camadas de informação (são baseadas num modelo de dados comum) é fundamental levando a uma consistência global dos produtos. Esta questão é tratada na norma S-98 cuja primeira edição, a publicar em 2022, dará prioridade às especificações/produtos identificadas para utilização, no futuro S-100 ECDIS, no designado Modo *Navigational Route Monitoring*, constituindo as expressas na Tab. I, o conjunto para o 1º Passo da implementação.

		Navigational Route Monitoring Mode (S-98 Edition 1.0.0)
1º PASSO	**S-101**	*Eletronic Navigational Chart (ENC*
	S-102	*Bathymetric surface*
	S-104	*Water Level Information for Surface Navigation*
	S-111	*Surface Currents*
	S-124	*Navigational Warnings*
	S-128	*Catalogue of Nautical Products*
	S-129	*Under Keel Clearance Management*

Tab. I. 1º conjunto de produtos S-100 a ser tratado pela Especificação de Interoperabilidade S-98

No Passo seguinte, serão associadas as camadas identificadas como utilizáveis no Modo *Navigational Route Planning,* conforme Tab. II dando prioridade ao S-122, S-127 e S-131 para operacionalização em 2026.

		Navigational Route Planing Mode (S-98 future editions)
PRÓXIMO PASSO	**S-122**	*Marine Protected Areas*
	S-123	*Marine Radio Services*
	S-125	*Marine Navigational Services*
	S-126	*Marine Physical Environment*
	S-127	*Marine Traffic Management*
	S-131	*Marine Harbour Infrastruture*

Tab. II. Lista de produtos S-100 a ser tratado pela Especificação de Interoperabilidade S-98

Para os produtos prioritários foi estabelecida uma fita de tempo para sua operacionalização, Fig. 5. As especificações operacionais estarão "ligadas" à Ed.5.0.0 do S-100 a publicar em 2022.

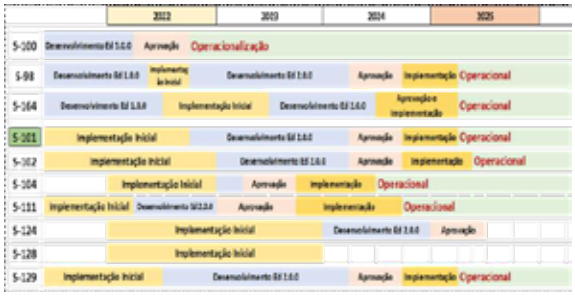


Fig. 5. Fita de tempo.

2.4. Coordenação e implementação dos serviços S-101 ENC

Em particular, para a fase transição das S-57 ENC para S-101 ENC relativa à produção e distribuição é necessário: o envolvimento/comprometimento do maior número possível de Estados Membros da OHI para iniciar a produção de S-101 ENCs em 2025 e a disponibilização gradual durante 2026 em paralelo

[6] ECDIS - *Electronic Chart Display and Information System - Navigation system which is designed, constructed and tested to meet the standards required for primary navigation under the SOLAS convention when combined with oficial* data. Sistema de Informação e Visualização de Cartas Eletrónicas de Navegação.

com a produção S-57 ENCs; que os RENCs e VARs (*Value Added Reseler)* estejam capacitados para alimentar o mercado, inclusive no suporte ao modo *Dual-Fuel* [7].

Durante a fase de transição está previsto ocorrer a produção e disponibilização paralela de S-57 ENC e S-101 ENC. Existem diversas abordagens para a conversão das S-57 ENC, para a produção das novas/futuras S-101 ENC e para a sua produção paralela, cabendo aos HOs decidir pela opção que considere mais adequada.

2 E-NAVIGATION, MSDI - CONCEITOS.

O *E-navigation d*estina-se a atender às necessidades atuais e futuras dos navegantes por meio da harmonização dos sistemas de navegação marítima e dos serviços de apoio em terra. Espera-se que forneça informação e infraestruturas digitais em benefício da segurança e proteção marítima, e da proteção do meio marinho, aumentando a eficiência do comércio e transporte marítimo. Introduzido em 2006, este conceito acompanhará o desenvolvimento tecnológico e os requisitos dos utilizadores.

A oportunidade dos HOs atenderem a uma comunidade de utilizadores mais ampla (fora da navegação) é necessária e está agora a ser considerada, decorrente da procura crescente do acesso a dados geoespaciais marinhos pelas várias comunidades de utilizadores.

A Hidrografia[8], no contexto dos MSDI, tem um papel fundamental no fornecimento de dados de base, como batimetria, fronteiras marítimas, linha de costa, áreas protegidas, entre outros. O envolvimento dos HOs naquele âmbito, pode assim proporcionar o conhecimento da importância da hidrografia e a visibilidade mais ampla pela comunidade de utilizadores.

Como produtor de dados e conhecimento marinho, os processos internos do IH, são mantidos em conformidade com as políticas nacionais, europeias e internacionais e os requisitos legais de partilha de informação. Para atender às necessidades relativas aos dados geoespaciais, o IH construiu um MSDI, "Hidrográfico+" (https://geomar.hidrografico.pt), em alinhamento com as melhores práticas e princípios da OHI, UN-GGIM, INSPIRE e IODE, e foi desenhado para suportar os mais variados tipos de utilizadores.

O desenvolvimento de um MSDI é um processo continuo, na medida em que novos requisitos e normativos para dados digitais estão ainda em desenvolvimento. Esperando-se a sua implementação para breve, a era digital levanta necessariamente vários desafios para os HOs.

Dentro da estrutura da OHI, está definido o grupo de trabalho, no qual o IH está representado, MSDIWG, para suportar e promover as atividades da OHI neste âmbito, atualmente presidido pela Dinamarca.

3 DESAFIOS FUTUROS. CONCLUSÕES.

A vantagem de ter conjuntos de dados, baseados no mesmo paradigma, é a sua compatibilidade mútua. A interoperabilidade suporta uma infinidade de combinações possíveis independentemente de qual domínio científico eles pertençam.

Dos benefícios apontados para a implementação do S-100, contam-se: a interoperabilidade; as viagens marítimas mais seguras, rápidas e económicas, aproveitando as tecnologias digitais para aprimorar as capacidades de navegação; a navegação autónoma; o desenvolvimento e manutenção mais facilitada; as novas capacidades e funcionalidades; o suporte a mais formatos dados; entre outros.

De entre os desafios que se colocam aos HOs e em particular no que diz respeito ao IH, estão: o estabelecimento de um plano de implementação; a metodologia de conversão S-57 em S-101; a produção de "S-101 ENC"; a identificação, construção e disponibilidade dos produtos indicados para a primeira fase da década de implementação; a identificação do *software* a utilizar; a contratação versus formação de recursos humanos. No contexto do MSDI, a harmonização de dados e o desenvolvimento de serviços web baseados em S-100 serão com certeza um desafio no futuro.

Ao nível dos organismos e da indústria estão, respetivamente, o desenvolvimento dos normativos e o desenvolvimento do software de produção e dos equipamentos ECDIS.

REFERÊNCIAS

IHO (2021). Roadmap for the S-100 Implementation Decade (2020-2030), Version 1.0, Rev. 1.

IHO Universal Hydrographic Data Model (Edition 4.0.0, December 2018)

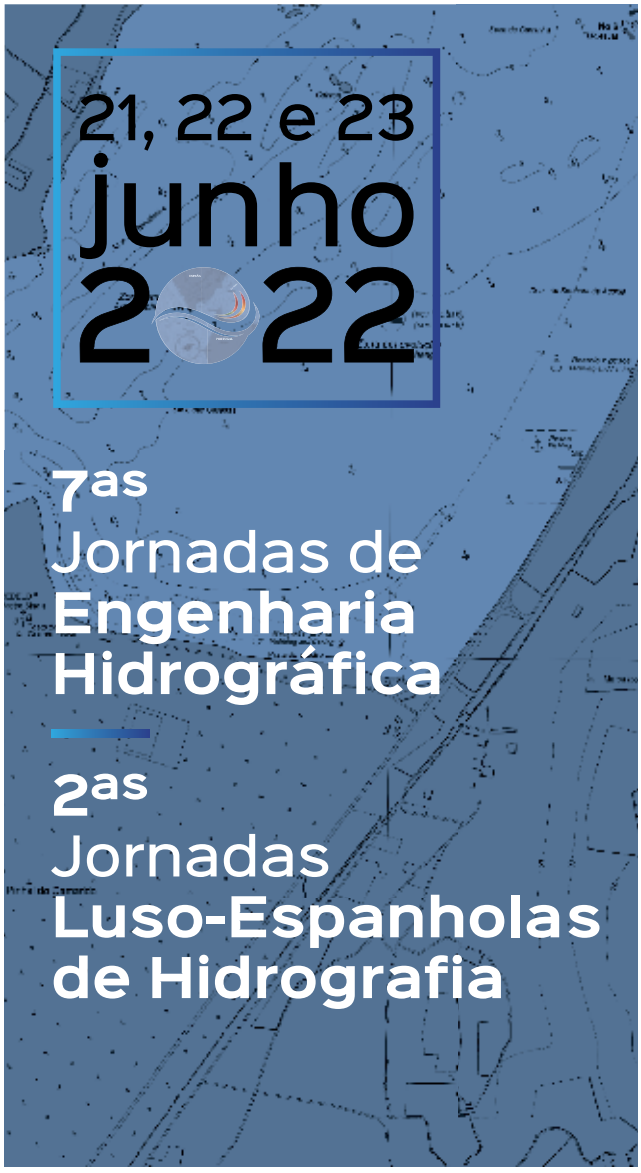
IHO S-100 Brochure "MUCH MORE THAN JUST NAUTICAL CHARTS"

Stilianos Contarinis, Athanasios Pallikaris and Byron Nakos (2021). The Value of Marine Spatial Open Data Infrastructures—Potentials of IHO S-100 Standard to Become the Universal Marine Data Model. *Journal of Marine Science and Engineering* 8, 564.

[7] *Dual-Fuel Mode* – Conceito asociado à produção e disseminação paralela de S-57 ENCs e S-101 ENCs durante o período de transição e à operação do ECDIS sob ese regime.

[8] Hidrografia é o ramo da ciência aplicada que lida com a medição e descrição das características físicas dos oceanos, mares, áreas costeiras, lagos e rios, bem como com a previsão de sua mudança ao longo do tempo.

SEGURANÇA DA NAVEGAÇÃO



Ripples - Web infrastructure for Supervision and Awareness

R. A. Santos (1), P. S. Dias (1), M. Ribeiro (1), M. Oliveira (1), J. Costa (1), M. Costa (1), P. Gonçalves (1), L. Venâncio (1), J. Galante (1), J. Pereira (1), J. Neiva (1), R. Mendes (1,2), A. S. Ferreira (1,2), G. Ramalho (1), J. Borges de Sousa (1)

(1) Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (LSTS), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal jtasso@lsts.pt, https://www.lsts.pt.

(2) Collaborative Laboratory +Atlantic, Porto, Portugal.

Resumo: Ripples is a web-based service for secure, persistent, and collaborative maritime data processing & analysis, aimed at high-level decision making and situational awareness. It was built upon the LSTS Toolchain as a centralized hub that concentrates and disseminates information between remote locations, providing a web-based Command and Control (C2), satellite communication interface, multi-vehicle planning, and a web frontend for those vehicles. Any device can access Ripples with a network connection. With this web infrastructure, it is possible to improve the awareness of operators and scientists while controlling multiple autonomous assets deployed in the open sea. This tool also provides services for the rest of the LSTS Toolchain, maintaining each operating team in the loop. Ripples is continuously under development to become the Multisystem Command and Control (C2). Besides visual enhancement to improve situational awareness, we also want to achieve more interoperability with other organizations in the future.

Palavras-chave: autonomous vehicles, collaborative maritime data, multisystem command and control (C2), ripples, situational awareness.

1. INTRODUCTION

Improving and optimizing situational awareness is crucial when multiple autonomous assets are deployed in the open sea. For scientists and operators, every type of information is essential to help the process of decision-making. Using the right tools, planning autonomous assets can be optimized to guarantee the vehicles' optimal trajectory and reduce the probability of accidents. Ripples is a cloud-based software that concentrates and disseminates data from multiple sources and controls different asset types. Being a web-based Command and Control (C2) infrastructure, security, persistent and maritime data such as current weather and ocean forecast and Automatic Identification System (AIS) is critical as well as the prediction for the time ahead.

On Ripples, there are layers available that allow the users to visualize some ocean parameters such as sea-surface temperature, sea-surface temperature, currents, wind, and bathymetry. It is also possible to verify the marine traffic provided by the AIS data, having the possibility to predict the future trajectory of each vessel in a time window. This prediction is helpful while planning and coordinating observations and measurements and detecting potential collisions between autonomous vehicles and surface traffic. These collisions trigger an alert and send a text message to the operators who subscribed to these via Ripples **(**Pinto et al., 2020**)**.

When dealing with multiple assets from multiple sources, it is mandatory to ensure security. Ripples has the concept of "domains", allowing us to group assets within different missions and purposes. The idea is propagated through the users and layers available. For example, a vehicle can only be visualized by a user in the same domain.

The users also have a "role" that filters the actions that a user can perform while interacting with the infrastructure.

2. RELATED WORK

Currently, there are fewer web-based applications that can provide a central location to access real-time operational data.

The Oceanographic Decision Support System (ODSS) developed by Monterey Bay Aquarium Research Institute (MBARI) is the one that can fulfil some of the goals that Ripples proposes. It can expose the current position of multiple autonomous vehicles and ships and track their position. It also provides weather and ocean forecasts and some specific layers with biology data (Gomes et al., 2013).

Another similar web-based tool is the Environmental Response Management Application (ERMA), developed by National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), the University of New Hampshire and the U.S. Environmental Protection Agency.

This Geographic Information System integrates static and real-time datasets such as Environmental Sensitivity Index maps (ESI), ships location and weather into a single interactive map. Provides

visualization of the situation and improves the communication and coordination among the environmental resource managers with the data necessary (NOAA, 2020).

3. IMPLEMENTATION

Ripples was built on top of the LSTS (*Underwater Systems and Technology Laboratory*) from the University of Porto – Faculty of Engineering Toolchain (Pinto et al., 2013) as a centralized hub gathering data and maintaining services each operating team in the loop. Web-based Command and Control (C2), satellite communication interface, multi-vehicle planning, and visualization of those vehicles are some of the services available.

Ripples backend is implemented in Java SE (Spring Boot) and the frontend is used React with Redux and Typescript. The software is hosted on the Digital Ocean infrastructure, which can occur be adjusted according to the needs for more resources.

Ripples provides a REST API that requires an HTTP request to access and use data to ingest and disseminate data through all the infrastructure. It is also this API responsible for transporting information between the backend and frontend and vice-versa. The frontend parses the data request in the JSON format and then displays it on the map using the LeafletJS framework. They are primarily used as a communications hub accessed using a web API or directly over satellite links when an Internet connection is unavailable.

4. COMMUNICATIONS

Ripples, the cloud service that concentrates and disseminates information coming from multiple remote locations (Fig. 1), provides multiple entry points through which the data can be passed (Pinto et al., 2018). The backend comprises a set of (micro-) services that can handle information from multiple sources listed below:

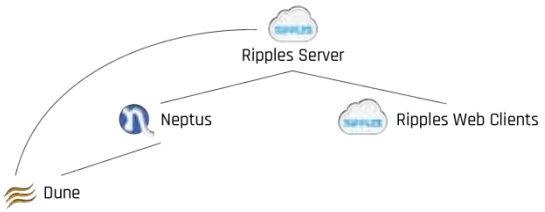


Fig. 1. Communications architecture.

4.1. FindMeSpot

This allows us to track known assets such as unmanned vehicles by receiving real-time GPS positions from SPOTracker devices.

4.2. AIS

Ripples ingests data about the current vessel's position from AISHub and Marine Trafic providers.

4.3. Iridium

Data can be pushed over Iridium satellite communications. Listen to short burst data (SBD) from RockBlock, Ground Control company. This feature is handy for oceanographic missions where vehicles and ships remain most of the time disconnected.

4.4. SMS alerts

When a fault or a potential collision with a ship is detected, if the service is available, Ripples can send information directly to the operator's mobile phone using Twilio.

4.5. Neptus

Provides real-time data push over the web (Web sockets and REST). Neptus is part of the LSTS Toolchain and is the software to command and monitor operations of all types of unmanned vehicles (Sousa Dias et al., 2005).

4.6. REST API

Ripples provide a REST API to access the data feed in the previous entry points using JSON and CSV formats. The endpoints are protected by “user role”, enabling the possibility to limit the actions of an operator, scientist, and an administrator. API Keys also protects them. This Keys allows us to access data under a closed domain. This safe feature lets us show some assets depending on the mission.

5. APPLICATIONS

Using Ripples interface, plans for the unmanned vehicles can be created and edited to complete the desired objectives. Some of the applications are listed bellow:

5.1. Bathymetric mapping

In order to map the seafloor, vehicles equipped with multibeam sonar can produce high-resolution bathymetry. Bathymetric maps illustrate the terrain that lies underwater. Variations in sea-floor relief may be depicted by color (Fig. 2).

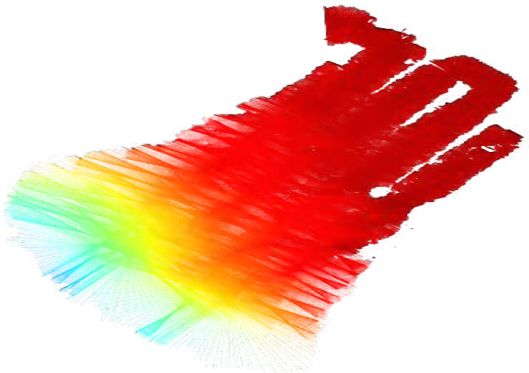


Fig. 2. Bathymetric mapping.

5.2. Sidescan

Sidescan sonars are used to create an image of large areas of the seafloor and identify submerged objects. (Fig. 3), represents a ship at the bottom of the sea captured by an autonomous underwater vehicle. Mine countermeasures are a typical military application where this kind of payload can be used. The goal of these operations is to clear safe pathways for ships to pass unharmed. The unmanned vehicle equipped with sidescan sonar is responsible for sweeping potential minefields.



Fig. 3. Sidescan sonar: Ship suncked.

5.3 Temperature profile

Vehicles equipped with CTD (conductivity, temperature, and depth) sensors can record different types of biological data. The unmanned vehicles can record temperature along the water column to measure the variation in each depth. This kind of data allows us to create a graph with profile temperatures (Fig. 4).

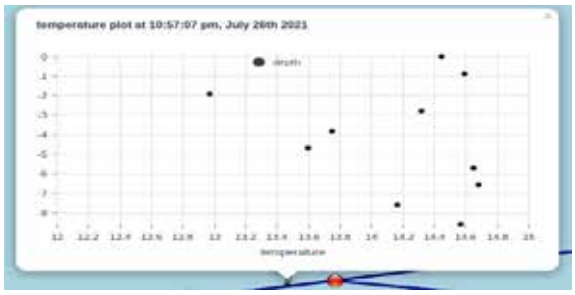


Fig. 4. Temperature profile.

WAVY drifters are another asset that enables in-situ measurements for marine environments and measures the temperature above and below the water. These surface drifters were created for the H2020 project MELOA (LSTS, 2017).

5.4. Pollution samples

RaMP (Rapid-response to Marine Pollution) proposes the empowerment of autonomous surface and submarine vehicles for prevention, monitoring, surveillance, and response to marine pollution events (LSTS, 2020). Ripples allow the operators/scientists to insert pollution markers and identify obstacles. In order to minimize the cost of operations, increase speed, and facilitate the identification of pollution sources, the operator can automatically generate the best trajectory to visit some pollution marker (Fig. 5).

The trajectory is created with the pollution markers and obstacles in conjunction with current numerical modeling tools.



Fig. 5. Trajectory automatically generated to visit a pollution marker.

6. CONCLUSION

Ripples has been used multiple times to successfully supervise the execution of heterogeneous autonomous vehicles in the most diverse of operational challenge environments. It is also used to monitor the execution of surveys and track the wavy drifters current deployed on the sea. Through a web browser, it can expose functionalities and data persistence for command and control interfaces. We have the possibility to access real-time data and make decisions at the time anywhere in the world; with the Internet connection as the only requirement, the possibilities to explore and learn more about the ocean increases significantly.

Acknowledgements

This work was supported by: Project RAMP - Rapid-response to Marine Pollution, FA_06_2017_077 - funded by Direção Geral da Política do Mar (DGPM) through the Fundo Azul program, Project JUNO - Robotic exploration of Atlantic waters - funded by Luso-American Development Foundation, and by GROOM-II funded by European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 951842.

REFERENCES

Gomes, K., et al., "ODSS: A decision support system for ocean exploration," 2013 IEEE 29th International Conference on Data Engineering Workshops (ICDEW), 2013, pp. 200-211, doi: 10.1109/ICDEW.2013.6547450.

Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (LSTS), 2020. RaMP: Rapid-response to Marine Pollution. [online] Available at: <https://ramp.lsts.pt/node/1/> [Accessed 14 April 2022].

Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (LSTS), 2017. Meloa. [online] Available at: <https://lsts.fe.up.pt/project/meloa> [Accessed 17 April 2022].

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2020. Environmental Response Management Application (ERMA). [online] Available at: <https://response.restoration.noaa.gov/resources/maps-and-spatial-data/environmental-response-management-application-erma> [Accessed 14 April 2022].

Pinto, J., Costa, M., Lima, K., Sousa Dias, P., Pereira, J., Ribeiro, M., Mendes, R., Castejón, F. , Gilabert, J., Tomasino, M. P., Magalhães, C., da Silva, J., Relvas, P., Lukaczyk, T., Skarpnes, K., Ludvigsen, M., Chekalyuk, A., Borges de Sousa, J. and Rajan, K., “To boldly dive where no one has gone before:Experiments in coordinated robotic ocean exploration.”, (2020).

Pinto, J., Sousa Dias, P., Martins, R., Fortuna, J., Marques, E. and Borges de Sousa, J., “The LSTS toolchain for networked vehicles systems”, 2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen, Bergen, 2013.

Pinto, J., Sousa Dias, P. and Borges de Sousa, J. «Ripples: a tool for supervision and control of remote assets». Instrumentation viewpoint, [en línia], 2018, Núm. 20.

Sousa Dias, P., et al., "Neptus - a framework to support multiple vehicle operation," Europe Oceans 2005, 2005, pp. 963-968 Vol. 2, doi: 10.1109/OCEANSE.2005.1513187.

PNT Resilience and the impact of satellite radio positioning disruptions on pilotage teams

D. Castro (1), V. Conceição (1), S. Cavaleiro (2)

(1) Escola Naval, Base Naval de Lisboa.

(2) Direção de Pessoal, Lisboa.

Abstract: The relevance of positioning, navigation and timing for success in maritime operations has grown significantly. Yet, satellite-based PNT - GNSS - fallibility raises resilience concerns, especially in Navigation Warfare environments and confined water spaces. Therefore, we initiated a quasi-experimental study on resilience performance under GNSS disruption by understanding how navigation teams deal with those conditions. Although the study participants are pilotage teams from the Portuguese navy, the pilot test analysed in this article was performed with 2 teams of midshipmen in a bridge navigation simulator. Besides collecting demographics and professional background data, the study intends to measure differences in performance, attitudes and behaviours, finding how these factors correlate with task accomplishment in the scenario above. The study's goal is to provide insight into teams and success factors in the face of GNSS disruption, effectively appraising the positioning resilience of the Portuguese navy.

Keywords: navigation safety, NAVWAR, PNT resilience, team performance; joint cognitive systems.

1. INTRODUÇÃO

Maritime operations involve an intricate array of activities with demanding objectives that can only be achieved through efficient and effective interaction between the platform, information systems, operators, and decision-makers. Given the growing complexity of the technology aboard ships and its capacities, technology has increasingly influenced this interaction (Hollnagel, 2005). One of the most pressing issues regarding technology dependency is maritime navigation safety and satellite radio positioning systems, especially the Global Navigation Satellite System (GNSS).

The requirements for the position, navigation, and timing sources have grown significantly in the past decade. The quality and integrity of those three factors have become a decisive element for success in many different industries, especially in the case of maritime operations. However, the proven fallibility of those systems has raised resilience concerns, which are especially relevant in Navigation Warfare (NAVWAR) environments (Trindade, 2018). Even if the GNSS can be a reliable source of Positioning, Navigation and Time (PNT), its characteristics also make it an easy target for intentional and unintentional disruptions. Many stakeholders are already acting on those concerns, looking to build resilience through both technology and users (Aresta, 2017).

One of the most critical activities in maritime operations is safe navigation, which is exceptionally sensible in confined water spaces, as is the case of entering and leaving port (Nepomuceno, 2018). The proposed solution is to address the issue of PNT resilience in these situations through the scope of bridge teams, namely their performance, attitudes, reactions, behaviours and interactions with both technology and other team members when faced with a GNSS disruption. The study aims to assess and analyze the impact these disruptions have on teams in the high-risk situation of conducting navigation in confined water spaces identifying in the process which are the success factors that determine superior PNT resilience.

2. METHODOLOGY

Although the initial intention was for the study's participants to be teams from different ships of the Portuguese navy, due to the unavailability of ships' navigation teams to proceed with the experimental trials, a pilot test was executed with the collaboration of the Portuguese Naval Academy and two groups of 5 midshipmen to validate the protocol and provide analysis examples that could, later on, be explored. The sessions, which have video and audio recordings, took place in a navigation simulator. The experiment is divided into three segments defined by different geographical positions. The first segment corresponds to the regular availability of GNSS signal, whilst in the second and third segments, the bridge will be subjected to GNSS spoofing and jamming, respectively. The team's performance will be assessed with the support of trained evaluators and performance checklists and requisites, which are already in place in the Portuguese navy, providing information on compliance with the procedures and exercise training goals. A measurement of the presence and intensity of two types of social network

ties – expressive and instrumental – will also be held, as it has been shown that they can contribute to team efficacy and performance. They will be mediated by three dimensions of a transactive memory system (TMS): specialization, credibility, and coordination. These assessments are complemented with more technical information related to the ship's movements, such as time on and off track.

Additionally, the FRAM (Patriarca et al, 2020) methodology (Functional Resonance Analysis Method) will be used to map the tasks and interactions while conducting navigation, facilitating the comparison between WOD (Work as Done) and WAI (Work as Imagined). Finally, based on a framework to evaluate human-machine systems (Stowers, 2017), a set of questionnaires are applied to assess situational awareness (Situational Awareness Rating Technique- SART, Taylor, 1990), cognitive workload (expanded NASA-Task Load Index, Coelho, 2015), propensity to trust and the perception of the reliability of the system, among other factors related to the relationship of the team with automation (Trust in Automation Questionnaire, Körber, 2018). The report elaborated by the experienced evaluators from CITAN (Centro Integrado de Treino e Avaliação Naval) will measure performance. On the other hand, interaction changes will be measured by registering all the interactions between team members and between them and the respective technology they operate. Since the Navigation Simulator didn't allow the simultaneous spoofing and jamming of all GNSS signal distribution, a technological solution was developed to introduce these disruptions in the Electronic Chart Display and Information System (ECDIS). In addition, several other adjustments had to be made to the protocol throughout the study to assure its feasibility. Although the study faced some delays due to the unavailability of ships' navigation teams to proceed with the experimental trials, we moved with a pilot test with the collaboration of the Portuguese Naval Academy and two groups of 5 midshipmen to validate the protocol and provide analysis examples that could, later on, be explored.

3. RESULTS

Given that the two teams were constituted by groups of midshipmen, one from the second year and another from the third, the demographical data and working experience were similar. In addition, both teams worked together previously in the Navigation course of the Academy and were aware of the dynamics and procedures of a pilotage team.

Both teams navigated the same distance, corresponding to two legs. Despite this, the duration varied because the speed was not the same

Team	1st leg (min)	2nd leg (min)	Total (min)
Team A	45	12	57
Team B	31	9	40

Tab. 1. Leg duration

The spoofing and jamming disruptions were introduced at the end of the 1st leg, continuing throughout the 2nd leg. While team B successfully detected the disruption and decided not to use ECDIS in the report cycles, team A members w\ere suspicious of some information displayed by the equipment but continued to rely on it to perform report cycles.

The average cross-track for each team is presented in the following table.

Average Cross-track (yards)		
Team	**1st leg**	**2nd leg**
A	150	350
B	175	200

Tab. 2. Average Crosstrack

Even though the two teams were able to assure a similar position control in the 1st leg, with team A inclusively being able to perform slightly better, the same did not occur in the 2nd leg, while under the effect of GNSS signal disruption, with team B being able to assert a far better position control.

Team A			
Interaction	**1st leg**	**2nd leg**	**Total**
Complete report	6	3	9
Incomplete report	0	0	0
NAVO-ECDIS	1	2	3
NAVO-RADAR	0	0	0
NAVO-Chart	2	2	4
ECDIS-RADAR	1	0	1
ECDIS-Chart	0	0	0
ECDIS-Watch	0	0	0
RADAR-Chart	0	0	0
Total separate interactions	4	4	8

Tab. 3. Team A interactions

Team B			
Interaction	**1st leg**	**2nd leg**	**Total**
Complete report	6	0	6
Incomplete report	1	2	3
NAVO-ECDIS	2	2	4
NAVO-RADAR	0	0	0
NAVO-Chart	2	3	5
ECDIS-RADAR	2	1	3
ECDIS-Chart	0	0	0
ECDIS-Watch	0	0	0
RADAR-Chart	0	0	0
Total separate interactions	6	6	12

Tab. 4. Team B interactions

Although both teams were able to complete the same number of complete reports in the 1st leg, it should be noted that the reports' rhythm was significantly higher in team B. As mentioned, the B team decided not to use ECDIS in the 2nd leg, therefore performing only incomplete reports. In addition, the occurrence of separate interactions in team B was higher in both legs, which could indicate a success factor in detecting the disruption and therefore attaining superior performance.

This performance could also be associated with the Trust in Automation (TiA) questionnaire results, which display a higher level of reliability and trust in automated systems, especially in the two roles that rely most on GNSS information: ECDIS and the chart.

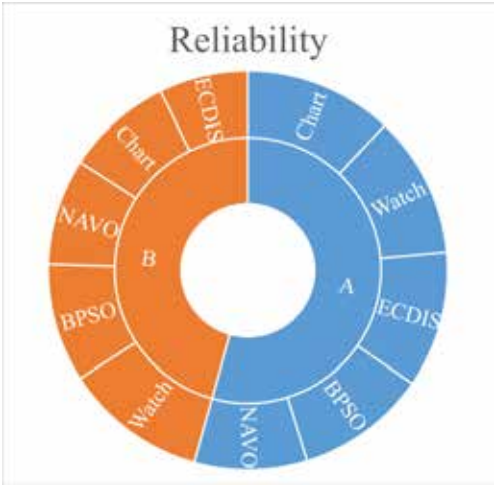


Fig. 1. Reliability in the automated system



Fig. 2. Trust in Automation

The SART questionnaire revealed a significant amplitude of results, ranging from 3 to 36, indicating a more substantial level of Situational Awareness in team B. However, despite the higher average, it is also interesting to note that the ECDIS Operator in team B had the lowest Situational Awareness value of all participants.



Fig. 3. Situational Awareness

NASA-TLX results also seem to demonstrate the same tendency. Team B rated a lower individual weighted Task Load Index and rating relatively low compared to team A in Team Unsupportiveness, meaning that the members of Team B, especially the ECDIS operator, felt more supported throughout the navigation which could have also been a success factor.

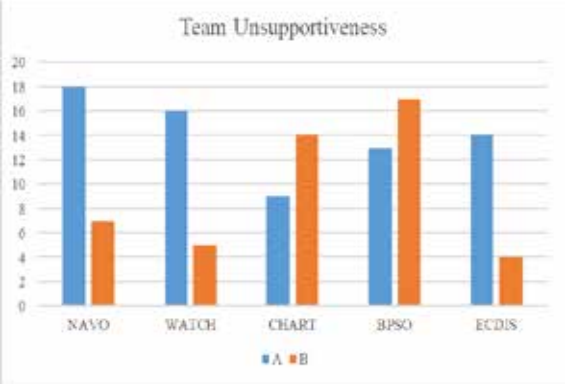


Fig. 4. Team Unsupportiveness



Fig. 5. Weighted Task Load Index

4. FINAL CONSIDERATIONS

With the protocol tested and the adequate tools to provide analysis cases such as those presented in this article, the study will proceed with pilotage teams from different ships of the Portuguese navy, with data collection and processing throughout the coming months. We expect that this quasi-experimental setting will enable the understanding of the success factors for facing GNSS disruption while navigating in confined water spaces. Given the study's exploratory nature and its broad scope, it intends to provide comprehensive insight into team processes and specifically into the pilotage's team ability to navigate and conduct maritime operations in the face of this adversity, effectively measuring the resilience of the PNT function in the Portuguese navy. The study's methodology can also be adapted to other maritime operations stakeholders and domains. Understanding the effects of a GNSS disruption on pilotage teams will define the success factors for more resilient navigation in demanding scenarios.

The study is expected to support the development of innovative solutions to maritime navigation safety and contribute to the development of technologies and processes that will consider one of the most significant factors in task success: people (teams). It will also help shape training, and formation requisites for pilotage teams adapted to operate in NAVWAR scenarios.

REFERENCES

Aresta, Catarina Matos (2017). "Resilience of the PNT Systems". MA thesis. Escola Naval

Nepomuceno, Guilherme Polainas (2020). “Estudo sobre a utilização do ECDIS na execução da navegação em águas restritas”. MA thesis. Escola Naval.

Trindade, Ana Dias da (2018). “Os sistemas globais de navegação por satélite no sistema de forças nacional”. Instituto Universitário Militar.

Hollnagel, Erik and David D Woods (2005). Joint cognitive systems: Foundations of cognitive systems engineering. CRC press

Stowers, Kimberly, James Oglesby, Shirley Sonesh, Kevin Leyva, Chelsea Iwig, and Eduardo Salas (2017). "A framework to guide the assessment of human–machine systems". In: Human factors 59.2, pp. 172–188.

Körber, Moritz (2018). "Theoretical considerations and development of a questionnaire to measure trust in automation". In: Congress of the International Ergonomics Association. Springer, pp. 13–30.

Taylor, R. M. (1990). “Situation awareness rating technique (SART): the development of a tool for aircrew systems design”. In Situational Awareness in Aerospace Operations (Chapter 3). France: Neuilly sur-Seine, NATO-AGARD-CP-478.

Coelho, D. A., Filipe, J. N. O., Marques, M. S. & Nunes, I. L. (2015). “The Expanded Cognitive Task Load Index (NASA-TLX) applied to Team DecisionMaking in Emergency Preparedness Simulation”. In: Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2014 Annual Conference, 4959 (2015).

R. Patriarca, G. Di Gravio, R. Woltjer, F. Costantino, G. Praetorius, P. Ferreira, E. Hollnagel (2020), “Framing the FRAM: A literature review on the functional resonance analysis method”. In Safety Science,Volume 129

Simulação com o SAFEPORT do impacto da tempestade Célia nos navios amarrados no porto de Sines

A. H. Gomes (1), L. V. Pinheiro (1), C. J. E. Fortes (1), J. A. Santos (2)(3)

(1) Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas (NPE). Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA). Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). ahgomes@lnec.pt

(2) Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL). Instituto Politécnico de Lisboa (IPL).

(3) Centro de Engenharia e Tecnologia Naval e Oceânica (CENTEC). Universidade de Lisboa (UL).

Resumo: Esta comunicação diz respeito à fase de testes do sistema SAFEPORT, tendo-se avaliado o seu desempenho numa situação de tempestade. Trata-se de um sistema desenvolvido para a segurança da navegação do porto de Sines, e, mais concretamente, nos seus terminais de Granéis Líquidos, Multiusos e Contentores. Para estes terminais, simulou-se o impacto da tempestade Célia nos esforços nos cabos de amarração de um navio petroleiro, de um navio de carga geral e de um navio porta-contentores, respetivamente. O sistema SAFEPORT demonstrou ser capaz de antecipar os efeitos nos navios amarrados dos estados de agitação associados à tempestade Célia.

Palavras-chave: navios amarrados, Sines, SAFEPORT, tempestade Célia.

1. INTRODUÇÃO

Os navios são o principal meio de transporte de cargas no comércio internacional e os portos surgem como elo entre o navio e o meio terrestre. Dada a importância capital de um porto na economia de um país ou de uma região, as autoridades portuárias apostam em ferramentas/instrumentos que garantam a máxima segurança de pessoas, equipamentos e navios nesse porto, bem como a máxima operacionalidade do porto.

Note-se que um dos aspetos que condiciona significativamente quer a segurança quer a operacionalidade do porto são as condições meteoceanográficas que ocorrem nesse porto. Por exemplo, em situações de tempestade, a segurança do navio amarrado e do cais podem ficar fortemente condicionadas, assim como as operações de carga e descarga, causando perdas financeiras significativas. Assim, é de fulcral importância o desenvolvimento de ferramentas para prever antecipadamente essas situações de emergência e que contribuam com informações para mitigar os problemas daí advindos.

O Porto de Sines é o porto de águas profundas de Portugal, líder nacional na quantidade de mercadorias movimentadas e fundamental no abastecimento energético do país. Opera 365 dias por ano, 24 horas por dia. Ciente da sua importância, a administração do porto tem apostado na modernização e dinamização do seu setor marítimo-portuário, assim como em manter os níveis de segurança.

O sistema de segurança para a navegação SAFEPORT, desenvolvido para o porto de Sines tem como objetivo ser um instrumento útil na gestão dos riscos associados aos navios amarrados (Gomes *et al., 2022*).

O sistema SAFEPORT fornece previsões diárias para as próximas 72 horas, com intervalos de 3 horas, da agitação marítima na entrada e dentro do porto e das suas consequências nos navios em manobras ou amarrados. A caraterização da agitação marítima é assegurada pelos modelos numéricos WAM, NAVGEM, XTide, SWAN e DREAMS. A avaliação do comportamento dos navios amarrados é realizada com a aplicação dos modelos WAMIT e BAS.

O modelo WAM (WAMDI Group, 1988) fornece as previsões, com 3 dias de antecedência, da agitação marítima ao largo. Os modelos NAVGEM (Whitcomb, 2012) e XTide (Flater, 1998) são aplicados para produzir as estimativas de vento e maré, respetivamente. O modelo numérico SWAN (Booij *et al.*, 1996) transfere a agitação marítima do largo para a entrada do porto. O modelo DREAMS (Fortes, 2002), por sua vez, transfere as características de agitação da zona de entrada do porto para dentro da bacia abrigada. O modelo numérico WAMIT (Korsemeyer *et al.*, 1988) determina a resposta do navio livre nos 6 graus de liberdade, sob a ação das ondas. Com a informação hidrodinâmica obtida, é possível determinar a resposta do navio amarrado, através da aplicação do modelo numérico BAS (Mynett *et al.*, 1985).

Nesta comunicação apresenta-se a aplicação do sistema de segurança para a navegação SAFEPORT, numa situação de tempestade. Em concreto, simula-se o impacto da tempestade Célia no porto de Sines, e em particular num navio petroleiro, num navio de carga geral e num navio porta-contentores, amarrados no Terminal de Granéis Líquidos (TGL), no Terminal Multiusos (TMS) e no Terminal de Contentores (TXXI), respetivamente.

2. TEMPESTADE CÉLIA

A tempestade Célia chegou a Portugal a 14 março de 2022. Foi a primeira tempestade, após um inverno caraterizado pela ausência de chuva, devido a um anticiclone de bloqueio.

O arquipélago da Madeira foi o local mais afetado pela tempestade Célia. Provocou vento forte, neve, granizo, chuva e temperaturas negativas. No Alentejo (Sines) e no Algarve foram registados aguaceiros, vento forte e trovoada. Durante a passagem da tempestade Célia, a boia do Instituto Hidrográfico instalada em frente ao porto de Sines registou estados de agitação com alturas significativas entre 2 m e 3,8 m e uma altura máxima de onda 7,4 m.

2.1. Caraterização da Agitação Marítima

Os parâmetros de agitação marítima avaliados pelo sistema SAFEPORT são a altura significativa (H_s), o período de pico (T_p) e a direção média (θ_m) dos estados de agitação marítima.

O modelo WAM previu ondas formadas devido à tempestade Célia (Figura 1) com H_s entre 3 m e 5,6 m nas fronteiras norte e oeste da malha de cálculo do SWAN e entre 2,8 m e 5,1 m na fronteira sul do mesmo domínio. Os valores T_p variaram de 10,9 s a 15,8 s na fronteira norte, de 10,6 s a 15,7 s na fronteira oeste e de 12,4 s a 15,8 s na fronteira sul. Relativamente ao θ_m, predominaram os rumos de norte e de noroeste.

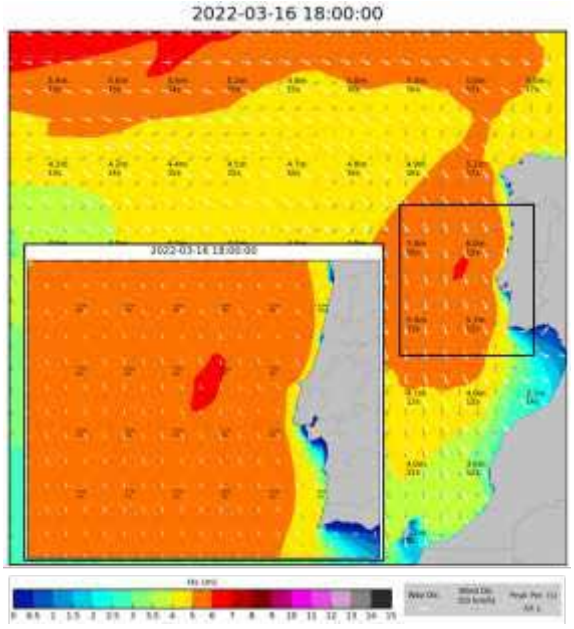


Fig. 1. Resultados do modelo WAM na costa ocidental de Portugal (H_s, T_p e θ_m) para o dia 16 de março de 2022 às 18h.

Com as previsões de agitação marítima, de vento e de maré, o modelo SWAN fez a caraterização das ondas formadas devido à tempestade Célia, na zona de entrada do porto de Sines (Figura 2).

Assim, segundo as simulações do SWAN, a tempestade caraterizou-se por ondas de H_s entre 2,9 m e 5,2 m, T_p entre 11 s e 15 s e θ_m entre 302° e 332°. A H_s máxima (pico da tempestade) ocorreu a 16 de março de 2022 às 18h, com o valor de 5,2 m.

A transferência da agitação marítima para dentro do porto de Sines, com o modelo DREAMS, resultou na caraterização das ondas que chegaram a cada terminal (Figura 3). Embora à entrada do porto o valor máximo de H_s tenha ocorrido no dia 16 de março de 2022 pelas 18h, nos terminais ocorreu durante o fim do dia 14 de março de 2022 e o início do dia 15 de março de 2022.

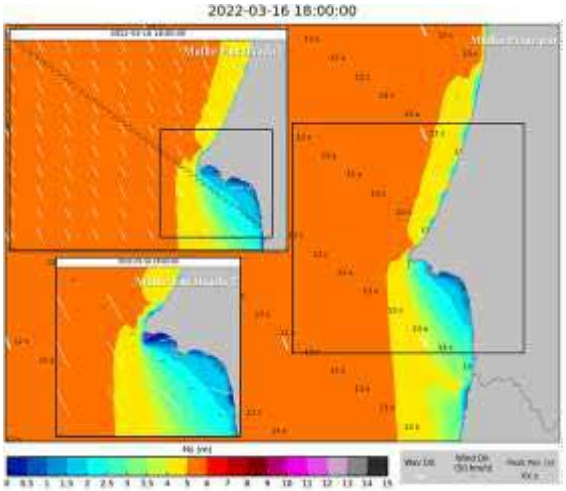


Fig. 2. Resultados do modelo SWAN ao largo do Porto de Sines (H_s, T_p e θ_m) para o dia 16 de março de 2022 às 18h.

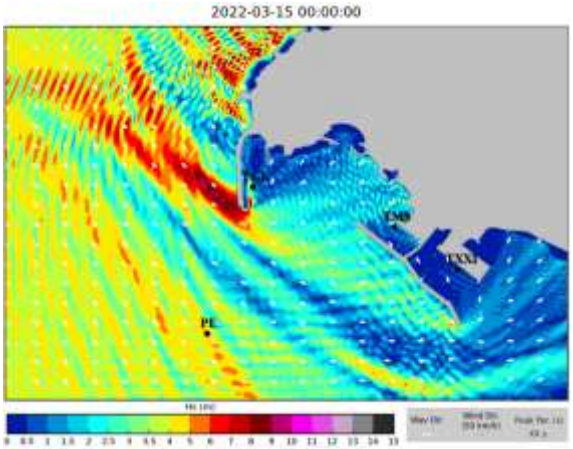


Fig. 3. Resultados do modelo DREAMS junto ao Porto de Sines e no seu interior (H_s, T_p e θ_m) para o dia 15 de março de 2022 às 00h.

No TGL, as características da agitação marítima foram θ_m de 160º a 253º e H_s entre 0,02 m e 1,32 m, sendo que o H_s máximo (1,32 m) ocorreu a 14 de março de 2022 às 21h. No TMS, as caraterísticas da agitação marítima foram θ_m entre 274º e 283º e H_s de 0,02 m a 0,92 m. O pico ocorreu no dia 15 de março de 2022 às 00h, com o valor de 0,92 m de H_s. Por fim, no TXXI o impacto da tempestade Célia resultou nas seguintes caraterísticas da agitação marítima: θ_m de 163º a 175º e H_s de 0,01 m a 1,1 m. A H_s máxima (pico da tempestade) ocorreu a 15 de março de 2022 às 06h, com o valor de 1,1 m.

2.2. *Resposta dos Navios*

Os navios simulados no sistema SAFEPORT representam de forma o mais abrangente possível os navios que operam no Porto de Sines. As superfícies molhadas dos cascos dos três navios foram discretizados em painéis planos triangulares e retangulares (Figura 4) para serem utilizadas como malha de cálculo do modelo WAMIT.



Fig. 4. Caraterísticas dos modelos dos navios simulados.

As simulações do modelo WAMIT foram realizadas para as possíveis direções de onda que se aproximam de cada terminal e uma gama de 89 frequências. Os resultados do modelo WAMIT, nomeadamente, os coeficientes hidrodinâmicos e as forças de excitação das ondas, constituem uma base de dados hidrodinâmica que é utilizada pelo modelo numérico BAS para determinar a resposta dos navios amarrados. Para cada navio foram considerados os esquemas de amarração apresentados na Figura 5.

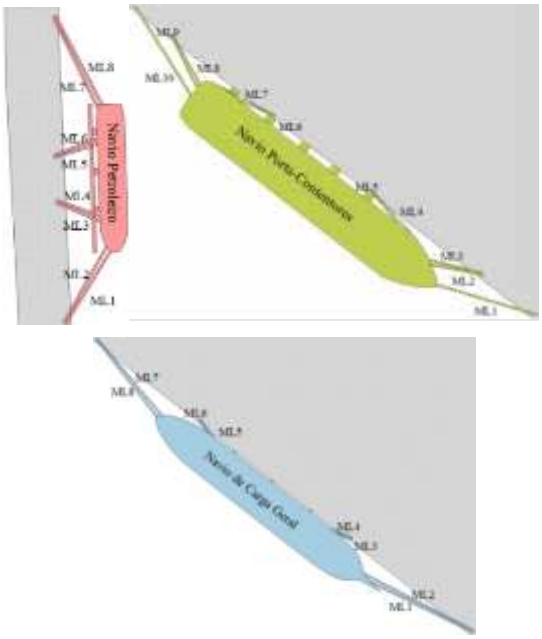


Fig. 5. Esquemas de amarração dos navios simulados.

No modelo BAS do navio petroleiro e do navio de carga geral, foram definidos 8 cabos de amarração e 5 defensas. Para o modelo do navio porta-contentores, um total de 10 cabos de amarração e 5 defensas foram preconizados.

As relações constitutivas de todos os cabos de amarração são lineares. Para um alongamento de 4%, a carga máxima nos cabos de amarração do petroleiro é de 2100 kN, no navio de carga geral é de 1900 kN e, no porta-contentores é de 1860 kN. Todas as defensas tinham as mesmas relações: uma compressão linear com uma força máxima de 8900 kN para uma deflexão de 1 m.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nas previsões de agitação marítima, com 72h de antecedência, o sistema SAFEPORT estima as forças nos cabos de amarração de navios amarrados em terminais do porto de Sines e emite alertas, baseados em níveis de perigo associados à carga de rotura dos cabos (MBL) ().

Tab. i. Níveis de perigo e os correspondentes limiares e símbolos utilizados no sistema SAFEPORT para emitir alertas.

Níveis de Perigo	Força	Alerta
0	<50% MBL	
1	50% MBL	
2	80% MBL	
3	100% MBL	

No gráfico da Figura 6 apresentam-se as forças nos cabos de amarração dos três navios sob a ação das ondas formadas devido a tempestade Célia.

Durante a tempestade Célia, não foram emitidos alertas para os cabos de amarração do navio petroleiro amarrado no Terminal de Granéis Líquidos. A força máxima exercida nas suas amarras foi de 403 kN no cabo 6, um valor muito próximo do limiar do alerta amarelo (nível de perigo 1).

Quanto ao navio de carga geral amarrado no Terminal Multiusos, foram emitidos alertas amarelos para os cabos de amarração 3, 4 e 7, alertas laranjas (nível de perigo 2) para os cabos de amarração 2 e 8, e alertas vermelhos (nível de perigo 3 - nível máximo) para os cabos 1 e 6. A força máxima exercida nos cabos de amarração do navio de carga geral foi de 1538 kN no cabo 1.

Durante a passagem da tempestade Célia, as operações de carga e descarga do navio de carga geral deveriam ser suspensas e o esquema de amarração reforçado pois, com o esquema adotado existe a possibilidade de rotura de cabos.

Finalmente, para o navio porta-contentores amarrado no Terminal de Contentores, o sistema emitiu 3 alertas amarelos para as regeiras 4, 6 e 7. As forças exercidas nos cabos de amarração ultrapassaram ligeiramente o limiar estabelecido para emitir alertas amarelos, sendo a força máxima de 595 kN estimada para o cabo 7. Nestas condições as operações de carga e descarga do navio devem ser suspensas.

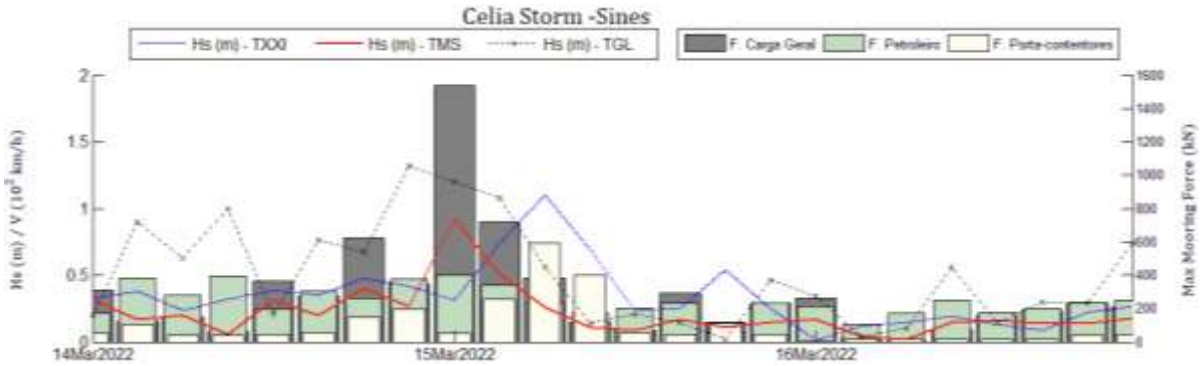


Fig. 6. Forças nos cabos de amarração dos navios durante a passagem da tempestade Célia. Quay 1, Quay 2, Quay 3 representam o TXXI, o TMS e o TGL, respetivamente. Ship 1, Ship 2 e Ship 3 representam o navio de carga geral, o navio petroleiro e o navio porta-contentores, respetivamente.

4. CONCLUSÃO

O objetivo final do sistema SAFEPORT é antecipar estados marítimos e atmosféricos potencialmente perigosos, como por exemplo durante uma situação de tempestade, permitindo tomar decisões informadas sobre as rotas de navegação e os procedimentos de atracação e aumentar a segurança dos navios e do porto.

Esta investigação faz parte da fase de testes do sistema SAFEPORT. Este sistema foi aplicado a uma situação de tempestade e os resultados foram analisados. Nesta comunicação, o sistema SAFEPORT demonstrou ser capaz de antecipar os efeitos nos navios das ondas formadas devido à tempestade de Célia.

Durante a tempestade Célia não foram registadas ocorrências gravosas pelo que, não se esperavam valores elevados para as forças exercidas nos cabos de amarração. À exceção do navio de carga geral, as amarras dos navios não foram muito solicitadas, como esperado. Quanto ao navio de carga geral, é de salientar que ele estava amarrado no terminal onde foram previstas ondas de menores alturas significativas. Este caso deve ser analisado de modo a calibrar o sistema SAFEPORT.

Esta informação pode ser utilizada para otimizar os esquemas de amarração e aumentar o nível de segurança dos navios amarrados.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao projeto BLUESAFEPORT (ref: FA_04_2017_016), à Infraestrutura Nacional de Computação Distribuída (INCD) por conceder acesso à infraestrutura digital de apoio à investigação, à Administração dos Portos de Sines e Algarve e ao Instituto Hidrográfico por conceder acesso aos dados da boia em frente ao Porto de Sines.

REFERÊNCIAS

Booij, N. R. R. C, Ris, R. C., and Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*, 104(C4):7649-7666. https://doi.org/10.1029/98JC02622

Flater, D. (1998). XTide Manual: Harmonic Tide Clock and Tide Predictor. *Technical Report*, USA. Disponível online em: https://flaterco.com/xtide

Fortes, C.J.E.M. (2002). Transformações não lineares de ondas em portos. Análise pelo método dos elementos finitos. *Tese de doutoramento em Engenharia Mecânica,* Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. Disponível em: http://repositorio.lnec.pt:8080/jspui/handle/123456789/8712

Gomes, A. H., Pinheiro, L. V., Fortes, C. J. E. M., and Santos, J. A. (2022). Applying the SAFEPORT System in a storm situation. *6th International Conference on Maritime Technology and Engineering* (MARTECH 2022). Lisbon, Portugal. Unpublished.

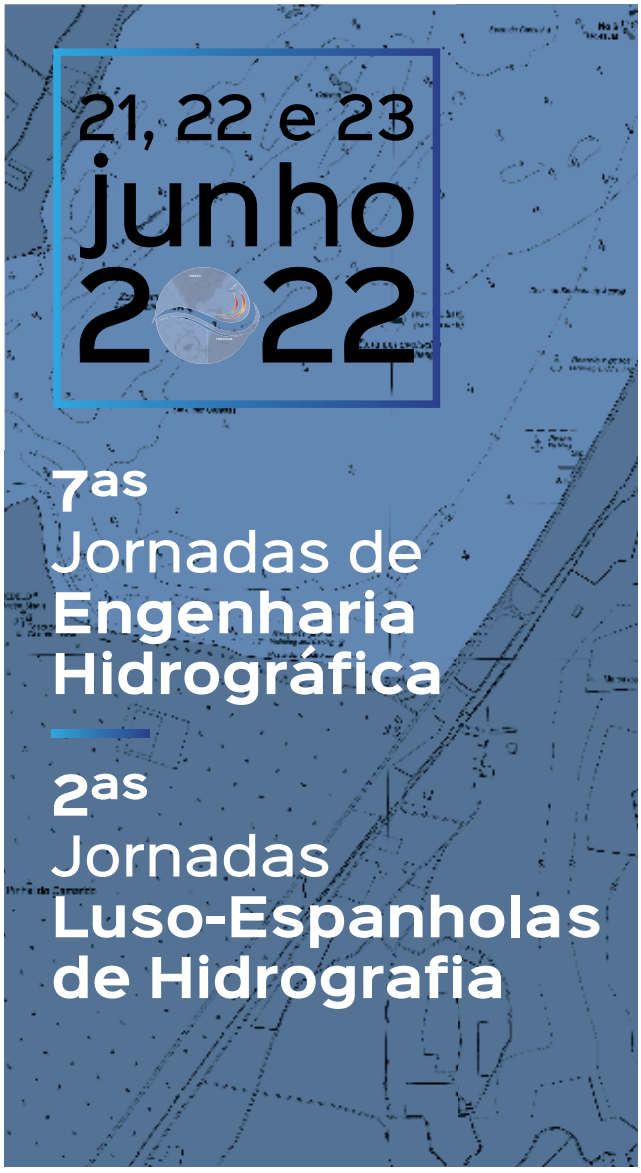
Korsemeyer, F.T., Lee, C.H., Newman, and J.N., Sclavounos, P.D. (1988). The analysis of wave effects on tension-leg platforms. *Proc. 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 1-14. Texas, Houston.

Mynett, A.E., Keunig, P.J., and Vis, F.C. (1985). The dynamic behaviour of moored vessels inside a harbour configuration. *Int. Conf. on Numerical Modelling of Ports and Harbour*, 23-25. Cranfield: BHRA. The Fluid Engineering Centre, April 1985. England: Birmingham.

WAMDI Group (1988). The WAM Model - A third generation ocean wave prediction model. *Journal Physical Oceanography* (18): 1775-1810.

Whitcomb, T. (2012) - Navy global forecast system, NAVGEM: Distribution and user support. *2nd Scientific Workshop on ONR DRI: Unified Parameterization for Extended Range Prediction.*

OCEANOGRAFIA



Modelação da análise e previsão de marés e correntes de maré – ferramenta SeaTideWave67

I. Raimundo (1), C. Costa (2)

(1) NRP "Almirante Gago Coutinho", Marinha, ines.cabanita@marinha.com.

(2) CINAV, Marinha, cnlcosta@gmail.com.

Resumo: Foi desenvolvida a ferramenta "SeaTideWave67" em MATLAB, a qual a partir de registos de observações de alturas de maré e/ou de correntes de maré, permite efetuar análises (métodos das séries de Fourier e de ajustamentos por mínimos quadrados) e previsões (fórmula harmónica) de maré e/ou de corrente de maré. O rigor e qualidade da ferramenta foram testados com recurso a estatísticas, espectros dos resíduos e comparações com previsões oficiais, revelando bons resultados em portos costeiros, onde seja escassa a influência de hidrodinâmicas de pequenas profundidades. Considera-se a ferramenta desenvolvida útil para apoio ao ensino de Oceanografia e apoio ao planeamento de operações no mar costeiro e portos.

Palavras-chave: análise, correntes de maré, marés, previsão, MATLAB, SeaTideWave67.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da maré é necessário em diversas atividades, desde a pesca de recreio até às vertentes mais operacionais, como mergulho, planeamentos de navegação ou levantamentos hidrográficos. Existem algumas aplicações, não oficiais, para análise e previsão da maré, p. ex. o software T_TIDE de Pawlowicz *et al*. (2002) e os World Tides e World Currents de Boon (2007). Na internet podem encontrar-se alusões a outros, quase todos de natureza comercial. Têm como limitações, além dos custos, não permitirem alterações no software. Este projeto surgiu com a motivação de desenvolver uma ferramenta simples e flexível, sem aquelas limitações, o SeaTideWave67, com recurso a MATLAB, que visa a análise e previsão de marés e correntes de maré, com utilidade prática sem, no entanto, pretender substituir as entidades oficiais responsáveis pela publicação de tabelas de maré e previsões online. Em Raimundo (2021) e em Raimundo e Costa (2021), aplicámos técnicas de análise e previsão, operacionalizadas na versão anterior da ferramenta (a SeaTideWave), bem como procedimentos para testes de avaliação da qualidade. Atualizou-se para a versão SeaTideWave67, com o acréscimo de 37 para 67 constituintes da maré. Foram acedidas fontes de dados: da *National Oceanic and Atmospheric Administration* para marés de Anchorage, de Monterey e de Boston, e para correntes de Fort Independence e Haste Shoal (ambos próximos de Boston) e de The Narrows (Seattle); do IH para marés de Leixões, de Lisboa, de Setúbal e de Faro-Olhão, e correntes de maré da Trafaria; e do *British Oceanographic Data Center* para marés de Ponta Delgada, Açores. Foi requerida a resolução de elementos orbitais do sol e da lua, bem como dos fatores nodais (de amplitudes e de fases) e os argumentos astronómicos ($V_0 + u$) das constituintes, aplicáveis nas previsões e análises. Estas, foram operacionalizadas por séries de Fourier (cf. Schureman, 1958, p. 71) e por ajustamento de mínimos quadrados (variantes de Boon e Kiley, 1978, pp. 3-5 e de Boon, 2004, p. 20), para a obtenção das constantes harmónicas das 67 constituintes. Os métodos de análise são usados com registos de durações flexíveis entre 29 e 369 dias, respeitando critérios para a separação das constituintes (cf. Schureman, 1958, p. 51, ou Parker, 2007, p. 88). Com a fórmula harmónica da maré, a qual requer as amplitudes e fases modificadas - *modified epochs* - (as constantes harmónicas) obtidas da análise, pode-se calcular as previsões. A validação das análises-previsões, é documentada através de dados experimentais, usando estatísticas (sobretudo desvio-padrão e redução de variância) dos registos de resíduos (observações subtraídas das previsões), pelo espectro de amplitudes desses resíduos (cf. Parker, 2007, pp. 162-163) e por comparações com as previsões oficiais.

2. METODOLOGIA

2.1. Astronomia

No sistema de análise-previsão são usadas 67 constituintes (S_a, S_{sa}, M_m, MS_f, M_f, $2Q_1$, Q_1, ρ_1, O_1, P_1, S_1, K_1, J_1, OO_1, $2N_2$, μ_2, N_2, ν_2, M_2, λ_2, L_2, T_2, S_2, R_2, K_2, $2SM_2$, M_3, M_4, MS_4, S_4, M_6, S_6, M_8, M_1, $2MK_3$, MK_3, MN_4, σ_1, MP_1, χ_1, π_1, ψ_1, ϕ_1, θ_1, SO_1, MNS_2, SO_3, SK_3, MK_4, $2MN_6$, MSN_6, $2MS_6$, $3MS_8$, $2(MS)_8$, $2MSN_8$, $2SM_6$, S_8, S_3, KJ_2, KQ_1, OQ_2, MKS_2, MSN_2, SN_4, SK_4, $2MK_6$ e MSK_6). Destas as 37 primeiras são usualmente adotadas, exceto em situações extremas de efeitos não lineares, devidos a propagação em pequenas profundidades (cf. Parker, 2007, pp. 88-89). As restantes 30 foram acrescentadas

àquelas 37, as da versão anterior da ferramenta, na tentativa de melhorar a qualidade, sobretudo na presença de efeitos das pequenas profundidades. Na transição de 37 para 67 constituintes, passou-se de 10 para 29 de pequenas profundidades. A astronomia de suporte para os elementos orbitais principais – longitudes do sol médio, da lua média, do perigeu lunar, do perigeu solar e do nodo ascendente da órbita lunar - seguem as fórmulas da teoria da órbita solar de S. Newcomb (1895) e da órbita lunar de E. Brown (1905), *apud* B. Simon (2013), pp. 105-106. Existem muitas frequências da maré associadas às órbitas da lua e do sol. O facto de a energia (amplitude) e fase das constituintes poderem ser quantificadas, para cada uma dessas frequências, permite a análise e a previsão da maré num determinado local e qualquer período de tempo. Nos trabalhos de Doodson, em 1921, e alguns outros, o desenvolvimento harmónico foi feito com base no "potencial gerador da maré", tendo sido quantificadas, com grande exatidão, as frequências (velocidades angulares) associadas a cada constituinte. O cálculo de funções orbitais secundárias – inclinação da órbita lunar e ascensão reta da interseção lunar, entre outras –, dos fatores nodais e dos argumentos astronómicos Greenwich (V_0 + u) seguem as fórmulas de Schureman (1958) e/ou os números de Doodson indicados p. ex. em Simon (2013).

2.2. *Análise harmónica*

A análise harmónica foi operacionalizada pela aplicação de três métodos: séries de Fourier e mínimos quadrados, este nas variantes de Boon e Kiley (1978) e Boon (2004). Devido à proximidade de frequências de algumas das constituintes, é necessário proceder à sua correta separação, de modo a evitar contaminações entre elas. Tendo em conta a duração dos registos, há restrições na quantidade de constituintes a separar. Registos de maior duração permitem separar mais constituintes, sendo os métodos de mínimos quadrados, relativamente a esta limitação, menos condicionados do que os de séries de Fourier. Optou-se por: separar 10 constituintes (M_2, S_2, N_2, K_1, M_4, O_1, M_6, S_4, S_6 e M_8) e inferir 15 (ν_2, μ_2, $2N_2$, OO_1, λ_2, M_1, J_1, ρ_1, Q_1, T_2, R_2, $2Q_1$, P_1, L_2 e K_2), para registos inferiores a 326 dias. Para registos maiores (de 326 a 369 dias) separam-se as 67 constituintes antes indicadas. O procedimento de inferência segue a metodologia indicada por Schureman (1958), pp. 78-79. Os detalhes da matemática respeitantes aos métodos de análise podem ser consultados nos trabalhos anteriores (Raimundo, 2021 e/ou Raimundo e Costa, 2021).

2.3. *Constantes harmónicas, previsão da maré e da corrente de maré*

Depois de obtidas as amplitudes e fases, a partir dos métodos de análise sobre os registos, é requerido uma adaptação dos valores, por forma a poderem ser usados na fórmula harmónica. As amplitudes, H_j, das constantes harmónicas adequadas para se aplicar na previsão obtêm-se dividindo as amplitudes obtidas dos métodos matemáticos, R_j, pelos fatores nodais, f_j, das respetivas constituintes. As fases ζ_j relacionam-se com os argumentos astronómicos $(V_0 + u)_j$, sendo usadas para obter: a) a *epoch* k_j, esta a soma da fase observada ζ_j e a fase do argumento local $(V_0 + u)_j$, no mesmo instante, i.e. $k_j = \zeta_j + local(V_0 + u)_j$; b) a *modified epoch* g_j, que envolve a longitude local λ e o fuso horário em que se pretende fazer a previsão, i.e. $g_j = k_j + p\lambda - (a_j\, S)/15$, na qual S é a longitude do meridiano central do fuso horário, a_j a velocidade angular das constituintes e p o índice das espécies (0 para longo período, 1 para diurnas, 2 para semidiurnas, 3 para terço-diurnas). Com as amplitudes e fases normalizadas, podem então ser aplicadas na fórmula harmónica, para as previsões. A previsão da maré rege-se pela seguinte expressão (o somatório é feito para as 67 constituintes do sistema):

$$h(t) = H_0 + \sum_{i=1}^{K=67} H_i f_i \cos(a_i t + Gr(V_0 + u)_i - g_i)$$

Para as correntes de maré é decomposto o registo temporal, de velocidades e direções, em duas componentes, por exemplo de enchente-vazante (EV) e sua ortogonal (ort), do que resulta, para cada constituinte, duas *modified epochs* g_{ortEVj} e g_{EVj} e duas amplitudes H_{ortEVj} e H_{EVj}.

$$h_{ortEV}(t) = H_0 + \sum_{i=1}^{K=67} H_{ortEVi} f_i \cos(a_i t + Gr(V_0 + u)_i - g_{ortEVi})$$

$$h_{EV}(t) = H_0 + \sum_{i=1}^{K=67} H_{EVi} f_i \cos(a_i t + Gr(V_0 + u)_i - g_{EVi})$$

2.4. *SeaTideWave67*

A SeaTideWave67 apresenta dois painéis: análise e previsão. O da análise (Figura 1), visa a obtenção das constantes harmónicas para cada porto ou local de marés ou correntes. Nela é feita a seleção de um conjunto de opções, que dependem do pretendido pelo utilizador. Na execução, pode-se escolher entre portos ou locais, selecionando um dos três métodos de análise, bem como uma duração do registo. Ao correr o programa surgem, numa tabela, as amplitudes e fases e os valores das componentes ortogonais (caso de correntes de maré) das constituintes. Também surgem listadas as observações, complementadas com gráfico das alturas de maré ou intensidade da corrente correspondente ao registo. As constantes harmónicas obtidas podem ser guardadas na pasta do software, para posterior carregamento e utilização. O painel da previsão (Figura 2) permite a seleção do tipo de previsão, seja de marés ou de correntes, e o dia pretendido. Há possibilidade de se alterar o fuso horário e os incrementos de tempo para a presentação das previsões. O programa proporciona numa tabela, os tempos e alturas de maré das preia-mares e das

baixa-mares, ou os valores da intensidade da corrente, dos máximos de enchente e de vazante e instantes dos estofos. Noutra tabela lista os valores, de acordo com o incremento de tempo selecionado. Um gráfico mostra a curva de maré ou componente de enchente-vazante da corrente de maré prevista.



Fig. 1. Visual do painel "Análise Harmónica", corrido para o porto de Lisboa, pelo método Boon (2004), para 326 dias iniciados em 27ABR15.



Fig. 2. Visual do painel "Previsão", corrido para a estação da Trafaria, pelo método Boon (2004), para 26JUN22.

2.5. Validação

Para testar o rigor dos métodos aplicados, dispõe-se de software para apurar estatísticas dos registos de resíduos, filtragem do registo temporal das observações pelo filtro de Doodson e Warburg (1941), *apud* Parker (2007), p. 128, para remoção da maré astronómica e obter a maré meteorológica. Se a qualidade da análise-previsão for boa os desvios-padrão são pequenos, a redução de variância próxima de 100% e as amplitudes do espectro de resíduo pequenas. Na Figura 3 mostram-se os gráficos espectrais dos resíduos, respeitantes ao controlo de qualidade, para Monterey, de 2JAN18 a 6JAN19, na posição φ=36,6050 N e λ=121,888330 W, pelo

método Boon (2004), análise de 369 dias. Embora não mostrado os resíduos estão compreendidos entre -0,25 m e 0,30 m, com tendências de crescimento e decréscimo correlacionadas com a estrutura da maré meteorológica obtida, após aplicação do filtro mencionado. Na Figura 3 salienta-se, no conjunto dos dois gráficos, escassa energia residual, com amplitudes de cerca de 0,5 cm, em períodos semidiurnos, e 0,7 cm em diurnos, o que revela a muito boa qualidade das constantes harmónicas obtidas.

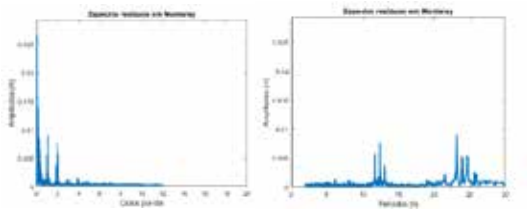


Fig. 3. Gráfico espectral da amplitude (m) de resíduos, em ciclos por dia (esq.) e em períodos (h) (dir.). Dados de Monterey de 2JAN18 a 6JAN19.

3. RESUMO DE RESULTADOS

Os resultados do controlo de qualidade foram resumidos na forma de tabelas, optando-se aqui, por gestão de espaço, mostrar apenas as estatísticas das estações de marés de Anchorage, Boston, Leixões e Ponta Delgada. Como pode ser visto na Tabela 1, no conjunto das quatro, Anchorage tem valores mais elevados de desvio-padrão, na ordem dos 21 a 25 cm. Os restantes apresentam desvios-padrão mais reduzidos, cerca de 16 cm para Boston, de 9 a 10 cm para Leixões e cerca de 6 cm para Ponta Delgada. Os métodos têm desempenhos diferentes, sendo verificada uma melhoria crescente na sequência Fourier, Boon e Kiley (1978) e Boon (2004), estes dois muito semelhantes. A Tabela 2 mostra o resumo estatístico para correntes em Fort Independence (próximo de Boston, em φ=42,3418 N e λ=71,0089 W, 3,8 m abaixo do ZH) e próximo da Trafaria (em φ=38,68016 N e λ=9,22027 W, 2 m abaixo do ZH). Destaca-se menores desvios-padrão para Fort Independence (cerca de 0,09 nós) em comparação com Trafaria (cerca de 0,32 nós), já que neste local as intensidades são bem mais intensas (valores de ponta de 4,5 nós versus cerca de 0,7 nós). De notar a maior dificuldade na previsão de correntes devido aos efeitos hidrodinâmicos, de caudais fluviais e da batimetria. A qualidade das constantes harmónicas conseguidas, para as correntes de maré, revela-se adequada para previsões de apoio ao navegante. Para documentar os resultados conseguidos com as 37 e com as 67 constituintes mostram-se as estatísticas dos resíduos na Tabela 3, para Anchorage, Lisboa e Leixões. Este procedimento foi também efetuado para Boston, Monterey, Setúbal, Faro-Olhão e Ponta Delgada (aqui não mostrado). As qualidades com 37 ou 67 constituintes são semelhantes, com ligeira melhoria com 67, em portos costeiros. Porém, no caso de Anchorage, onde a maré de elevada amplitude propaga grande distância em pequenas profundidades, há uma clara melhoria com as 67 versus 37 constituintes, com o desvio padrão a reduzir de 28 cm para 21 cm e a redução de variância mais próxima de 100%. Isto mostra a mais valia de usar 67 constituintes, sobretudo para portos de águas interiores. As médias dos resíduos não alteram, pois dependem quase só da diferença entre o nível médio do mar observado e o nível adotado para a previsão.

Anchorage (análise de 369 dias - 2JAN18 a 5JAN19) 67 constituintes					
Valores (m)	**Média**	**Máximo**	**Mínimo**	**Des. Pad.**	**RV (%)**
Boon (2004)	0,1929	1,3007	-0,8238	0,2151	99,38
Boon e Kiley (1978)	0,1929	1,3008	-0,8238	0,2151	99,38
Fourier	0,1927	1,5162	-0,9219	0,2544	100,57
Boston (análise de 369 dias - 2JAN18 a 5JAN19) 67 constituintes					
Valores (m)	**Média**	**Máximo**	**Mínimo**	**Des. Pad.**	**RV (%)**
Boon (2004)	0,1487	1,2176	-0,5728	0,1599	97,74
Boon e Kiley (1978)	0,1487	1,2176	-0,5729	0,1599	97,74
Fourier	0,1488	1,2362	-0,6755	0,1686	99,28
Leixões (análise de 365 dias - 12JUL05 a 13JUL06) 67 constituintes					
Valores (m)	**Média**	**Máximo**	**Mínimo**	**Des. Pad.**	**RV (%)**
Boon (2004)	0,1478	0,5877	-0,0842	0,0879	98,76
Boon e Kiley (1978)	0,1478	0,5875	-0,0842	0,0879	98,75
Fourier	0,1478	0,6333	-0,1842	0,0974	98,55
Ponta Delgada (análise de 369 dias - 1JAN94 a 4JAN95) 67 constituintes					
Valores (m)	**Média**	**Máximo**	**Mínimo**	**Des. Pad.**	**RV (%)**
Boon (2004)	0,0504	0,3485	-0,1368	0,0636	99,85
Boon e Kiley (1978)	0,0504	0,3241	-0,141	0,0609	97,64
Fourier	0,0504	0,3485	-0,1368	0,0636	99,85

Tab. 1 - Tabela resumo das estatísticas para Anchorage e Boston (EUA) e para Leixões e Ponta Delgada (Portugal).

Fort Independence (análise de 29 dias - 1JUL a 29JUL11)					
Valores (nós)	**Média**	**Máximo**	**Mínimo**	**Des. Pad.**	**RV (%)**
Boon (2004)	-0,0003	0,513	-0,3377	0,0889	91,46
Boon e Kiley (1978)	-0,0003	0,513	-0,3377	0,0889	91,46
Fourier	-0,0002	0,5248	-0,3572	0,0925	90,84
Trafaria (análise de 54 dias - 5MAI a 27JUN16)					
Valores (nós)	**Média**	**Máximo**	**Mínimo**	**Des. Pad.**	**RV (%)**
Boon (2004)	-0,0035	1,1482	-1,127	0,3245	95,73
Boon e Kiley (1978)	-0,0035	1,1482	-1,2773	0,3245	95,71
Fourier	-0,0035	1,2741	-1,3186	0,3164	101,76

Tab. 2 - Tabela resumo das estatísticas dos resíduos para Fort Independence, Boston, MA (EUA) e Trafaria, Lisboa (Portugal).

Anchorage (análise de 369 dias - 2JAN18 a 5JAN19) 67 constituintes					
Valores (m)	**Média**	**Máximo**	**Mínimo**	**Des. Pad.**	**RV (%)**
Boon (2004)	0,1929	1,3007	-0,8238	0,2151	99,38
Anchorage (análise de 369 dias - 2JAN18 a 5JAN19) 37 constituintes					
Valores (m)	**Média**	**Máximo**	**Mínimo**	**Des. Pad.**	**RV (%)**
Boon (2004)	0,1929	1,5594	-1,0152	0,2808	98,96
Leixões (análise de 365 dias - 12JUL05 a 13JUL06) 67 constituintes					
Valores (m)	**Média**	**Máximo**	**Mínimo**	**Des. Pad.**	**RV (%)**
Boon (2004)	0,1478	0,5877	-0,0842	0,0879	98,76
Leixões (análise de 365 dias - 12JUL05 a 13JUL06) 37 constituintes					
Valores (m)	**Média**	**Máximo**	**Mínimo**	**Des. Pad.**	**RV (%)**
Boon (2004)	0,1478	0,5972	-0,0947	0,0887	98,75
Lisboa (análise de 326 dias - 27ABR15 a 25ABR16) 67 constituintes					
Valores (m)	**Média**	**Máximo**	**Mínimo**	**Des. Pad.**	**RV (%)**
Boon (2004)	0,0991	0,3878	-0,1033	0,0636	99,50
Lisboa (análise de 326 dias - 27ABR15 a 25ABR16) 37 constituintes					
Valores (m)	**Média**	**Máximo**	**Mínimo**	**Des. Pad.**	**RV (%)**
Boon (2004)	0,0991	0,3966	-0,1161	0,0665	99,46

Tab. 3 - Tabela resumo das estatísticas dos resíduos para Anchorage, AK (EUA), Leixões e Lisboa (Portugal), para análises-previsões de 67 e 37 constituintes, método de Boon (2004).

4. CONCLUSÃO

A ferramenta SeaTideWave67 e as suas versões simplificadas, para análise e para previsão, consideram-se uma mais-valia para apoio ao ensino de Oceanografia e planeamento de operações em zonas costeiras ou portuárias. Dos três métodos de análise, o de mínimos quadrados de Boon (2004), proporciona, na maioria das vezes, os melhores resultados, pelo que se tomou como método principal. Os resultados revelam muito boa qualidade das análises-previsões, sobretudo com as constantes harmónicas resultantes de análises de registos de 365 ou 369 dias. No caso de Anchorage, onde são acentuados os efeitos de distorção da maré, devidas à propagação em pequenas profundidades, a qualidade conseguida é boa. A qualidade da análise-previsão das correntes de maré é menos conseguida do que a das marés, o que em geral acontece; são mais turbulentas e instáveis e, quase sempre, só estão disponíveis registos de curta duração. O aumento de 37 para 67 constituintes não trouxe significativa melhoria de qualidade dos resultados conseguidos para os portos costeiros testados, o que era expetável. No entanto, no caso de Anchorage, onde a maré tem propagação extensa por pequenas profundidades, salienta-se uma melhoria significativa, o que deverá acontecer em geral, embora aqui não testado, para águas interiores. Progressos futuros poderão passar por acrescentar outros portos ou locais com dados, onde sejam pretendidas previsões, para os fins de planeamento e de ensino.

Agradecimentos

Agradecemos à EN, ao CINAV e ao IH pelo apoio à realização deste trabalho. À Dra. Dora Carinhas, por intermediar a cedência de dados e pelas sugestões, e ao Prof. Miguel Moreira pelo aconselhamento e pela motivação.

REFERÊNCIAS

Boon, J. D. e Kiley, K. P. (1978). Harmonic analysis and tidal prediction by the method of least squares: A user's manual.

Boon, J. D. (2004). Secrets of the tide: Tide and Tidal Current Analysis and Predictions, Storm Surges and Sea Level Trends. Woodhead.

Boon, J. (2007). World Tides User Manual. Gloucester Point.

Pawlowicz, R., Beardsley, B. e Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis with error analysis in MATLAB using T_TIDE. Computers Geosciences, 28, 929–937.

Parker, B. B. (2007). Tidal analysis and prediction.

Raimundo, I. (2021). Análise e Previsão de Marés e Correntes de Maré – Desenvolvimento da Ferramenta e Aplicação Prática, Dissertação de Mestrado, Escola Naval.

Raimundo, I. e Costa, C. (2021). Tide and Tidal Current Analysis and Prediction Tool, Oceans 2021, San Diego – Porto, 20-23SET21, https://ieeexplore.ieee.org/document/9705870 .

Schureman, P. (1958). Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides, volume 4. US Government Printing Office.

Simon, B. (2013). Coastal Tides. Institut Océanographique, Fondation Albert Ier, Prince de Monaco.

Satellite-derived sea surface salinity for the Portuguese coast - evaluation of SMOS BEC L4 product

B. Biguino (1), E. Olmedo (2), A. Ferreira (1), N. Zacarias (3), L. Lamas (3), L. Favareto (1), C. Palma (3), C. Borges (3), A. Teles-Machado (4), J. Dias (1,5), P. Castellanos (1), A. C. Brito (1,6)

(1) MARE—Marine and Environmental Sciences Centre, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal. bibiguino@fc.ul.pt.

(2) Barcelona Expert Center, Institut de Ciències del Mar, CSIC, Passeig Marítim de la Barceloneta, 37–49, E-08003 Barcelona, Spain.

(3) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal.

(4) IDL—Instituto Dom Luiz, Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), 1495-006 Lisboa, Portugal.

(5) Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal.

(6) Departamento de Biologia Vegetal, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal.

Abstract: The measurement of salinity by satellite remote sensing is challenging in coastal systems, mainly due to the spatial resolution of the existing products. However, assessing this parameter is essential to understand physical processes and investigate climate change effects. Therefore, the present study aims to evaluate the quality of a new higher resolution (5 km) L4 SMOS sea surface salinity product distributed by the Barcelona Expert Center. The satellite data was tested for the Portuguese coast through the comparison with *in situ* observations collected within AQUIMAR project and with modeled salinities from CMEMS IBI Ocean Reanalysis system. Also, a seasonal and interannual analysis was conducted. The satellite dataset presented good performance in the comparison with the *in situ* observations (R^2=0.66, RMSE=0.326, Bias=–0.149), higher than the model. However, the proximity to coast influenced the quality of the satellite data. Overall, this product showed a high potential to worldwide coastal climatological studies.

Keywords: climate change, CMEMS IBI Ocean reanalysis system, coastal ocean, SMOS, surface salinity.

1. INTRODUCTION

Together with temperature, salinity is an important climate parameter whose worldwide variations are essential to be investigated in order to understand climate change (Jain, 2011; Durack *et al.*, 2016). Satellite remote sensing emerged in 2009 (Font *et al.*, 2010) as a valuable tool for the measurement of the sea surface salinity. However, there is still a challenge to retrieve surface salinity data in near coastal regions, due to the dynamic and variability inherent to these systems and its processes (Guimbard *et al.*, 2021). Furthermore, land contamination and high levels of radio frequency interference may act as main limiting factors in obtaining high-quality coastal salinities (González-Gambau *et al.*, 2017; Grodsky *et al.*, 2019; Vazquez-Cuervo *et al.*, 2019).

To overcome all of these limitations, the Barcelona Expert Center (BEC) created a new and higher resolution SMOS global L4 product (Olmedo *et al.*, 2021), whose quality for coastal measurements along the Iberian Peninsula was tested within the present study, through the comparison with *in situ* observations. An evaluation of the product for long-term analysis was also conducted considering the salinity spatial, seasonal and interannual variability.

2. DATA AND METHODOLOGY

Along the Portuguese coast, *in situ* salinity was determined using observations obtained during three oceanographic cruises conducted between 2018 and 2019. Version 2 of SMOS level 4 (L4) daily SSS product (5 km), created and distributed by the BEC team through its data visualization and distribution service, was considered (temporal coverage of 9 years, 2011-2019; available at http://bec.icm.csic.es/bec-ftp-service/). Additionally, daily sea surface salinity data from the Iberian Biscay Irish (IBI) Ocean Reanalysis system (8.3 km) was also considered for the comparison with satellite and *in situ* salinities (Product identifier-IBI_MULTIYEAR_PHY_005_002;https://resource.marine.copernicus.eu/products) (Baladrón *et al.*, 2020).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The satellite product presented more satisfying results in retrieving surface coastal salinities than those of previous works (*e.g.*, Bao *et al.* (2019); Vazquez-Cuervo *et al.* (2018)) - R^2=0.66, RMSE=0.326 and Bias=–0.149, considering the whole dataset. The better performance of the satellite regarding the model (R^2=0.56, RMSE=0.624 and Bias=–0.527), suggest that its assimilation by the model could be advantageous for a better understanding of this region. Still, the satellite's performance worsened for observations in proximity to land and in the presence of small river plumes.

The product was also shown as useful for conducting spatial variability analyses and to be considered in interannual assessments of salinity. An increasing north to south salinity gradient was observed, as in Moita (2001) and Campuzano *et al.* (2018), as well a cross-shore gradient with lower salinities on the coast. Moreover, a statistically significant decreasing trend was observed for almost the whole coast but, as the studied time series is short for long-term analysis, further investigations will be needed to conclude on the origin of this observations.

Acknowledgments

This work was conducted within the framework of the project AQUIMAR—Marine Knowledge Supporting Aquaculture (MAR-02.01.01-FEAMP-0107), funded by the Mar 2020—Operational Program Mar2020. The authors thank all the colleagues from IH and MARE for the fieldwork support.

REFERENCES

Baladrón, A. A., Levier, B. and Sotillo, M. G. (2020). Product User Manual for Atlantic - Iberian Biscay Irish- Ocean Physics Reanalysis Product IBI_MULTIYEAR_PHY_005_002.

Bao, S., Wang, H., Zhang, R., Yan, H. and Chen, J. (2019). Comparison of Satellite-Derived Sea Surface Salinity Products from SMOS, Aquarius, and SMAP. Journal of Geophysical Research: Oceans, 124(3), pp. 1932–1944.

Campuzano, F., Santos, F., Ramos de Oliveira, A. I., Simionesei, L., Fernandes, R., Brito, D., Olmedo, E., Turiel, A., Alba, M., Novellino, A., Tonani, M., Lewis, H., García Sotillo, M., Amo Baladrón, A., Dabrowski, T., Jacob, B., Staneva, J. and Neves, R. (2020). Framework for improving land boundary conditions in regional ocean products. EGU General Assembly.

Durack, P. J., Lee, T., Vinogradova, N. and Stammer, D. (2016). Keeping the lights on for global ocean salinity observation. Nature Climate Change, 6(3), pp. 228–231.

Font, J. Camps, A., Borges, A., Martín-Neira, M., Boutin, J., Reul, N., Kerr, Y., Hahne, A. and Mecklenburg, S. (2010). SMOS: The Challenging Sea Surface Salinity Measurement From Space. Proceedings of the IEEE, 98(5), pp. 649–665.

González-Gambau, V. Olmedo, E., Martínez, J., Turiel, A. and Durán, I. (2017). Improvements on Calibration and Image Reconstruction of SMOS for Salinity Retrievals in Coastal Regions. IEEE jounal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, pp. 1–15.

Grodsky, S. A., Reul, N., Bentamy, A., Vandemark, D. and Guimbard, S. (2019). Eastern Mediterranean salinification observed in satellite salinity from SMAP mission. Journal of Marine Systems, 198.

Guimbard, S., Reul, N., Sabia, R., Herlédan, S., Hanna, Z., Piollé, J., Paul, F., Lee, T., Schanze, J., Bingham, F., Vine, D., Vinogradova-Shiffer, N., Mecklenburg, S., Scipal, K. and Laur, H. (2021). The salinity pilot-mission exploitation platform (Pi-mep): A hub for validation and exploitation of satellite sea surface salinity data. Remote Sensing, 13(22).

Jain, C. K. (2011). Salinity, in Singh, V. P., Singh, P., and Haritashya, U. K. (eds) Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. Dordrecht: Springer Netherlands, p. 959.

Moita, M.T. (2001). Estrutura, Variabilidade e Dinâmica do Fitoplâncton na Costa de Portugal Continental. Ph.D. Thesis, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Olmedo, E., González-Haro, C., Hoareau, N., Umbert, M., Gambau, V., Martínez, J., Gabarró, C., and Turiel, A. (2021). Nine years of SMOS sea surface salinity global maps at the Barcelona Expert Center. Earth System Science Data, 13(2), pp. 857–888.

Vazquez-Cuervo, J., Fournier, S., Dzwonkowski, B. and Reager, J. (2018). Intercomparison of in-situ and remote sensing salinity products in the Gulf of Mexico, a river-influenced system. Remote Sensing, 10(10).

Vazquez-Cuervo, J., Gomez-Valdes, J., Bouali, M., Miranda, L., Van der Stocken, T., Tang, W. and Gentemann, C. (2019). Using saildrones to validate satellite-derived sea surface salinity and sea surface temperature along the California/Baja coast. Remote Sensing, 11(17).

On the variability of internal waves on the western Portuguese shelf

J. M. Magalhaes (1,2), J. C. B. da Silva (2,3), R. Nolasco (4), J. Dubert (4), P. B. Oliveira (5)

(1) CIIMAR, Universidade do Porto, Rua dos Bragas 289, 4050-123 Porto, Portugal. Corresponding author: J. M. Magalhaes (jorge.magalhaes@fc.up.pt).

(2) Department of Geoscience, Environment and Spatial Planning, Faculty of Sciences, Uni. of Porto, Porto, Portugal.

(3) Instituto de Ciências da Terra, Polo Porto, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007 Porto, 12 Portugal.

(4) Departamento de Física e Centro de Estudos Do Ambiente e Do Mar (CESAM), Universidade de Aveiro, 3810-193, Aveiro, Portugal.

(5) IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Av. Alfredo Magalhães Ramalho, 1495-165, Lisboa, Portugal.

Abstract: Quantifying changes in the ocean involves establishing meaningful background states, which may be masked owing to wave phenomena. In this study we use moored temperature records to study Internal Wave (IW) variability scales off the western Portuguese shelf. The data shows significant variability in similar timescales of the waves' typical propagation lifespan. A regional ocean circulation model is used with linear theory to assess how mesoscale variability is contributing to the observed variability patterns. Results show that IW variability owing to changes in stratification is found to amount to about half of that in background flows, but its effect can go unnoticed within the largest contributions from mesoscale currents.

Keywords: internal waves, mesoscale variability, Portugal.

1. INTRODUCTION

The ocean is a continuously evolving environment. Understanding how it evolves means establishing background states from which differences can be measured and investigated. This can be challenging due to supra-inertial phenomena (i.e. with frequencies greater than the inertial frequency) that can mask its evolving patterns.

Internal Waves (IWs) are part of these phenomena, whose defining characteristic is that their largest vertical amplitudes occur in the ocean's interior (see Gerkema and Zimmerman, 2008). Interestingly, from an historical perspective, the importance of IWs was early recognized in the 1900s, precisely when trying to establish reliable background states in the ocean environment (see e.g. Gerkema and Zimmerman, 2008). Since then much has been learned about their governing dynamics, but their variability sources, magnitudes, and scales are still not fully understood.

IWs in the ocean are commonly tidally generated, and result from the interaction between the barotropic tide and steep bottom bathymetry. Therefore, it may seem appealing to assume that IWs variability could be predicted, given that their origin lies in predictable tides. However, IW systems in coastal environments can be highly unpredictable (Jeans and Sherwin, 2001; Nash et al., 2012).

In this study, we focus on a coastal IW field (previously documented in Magalhaes et al., 2021, see Fig. 1) and seek to build on previous results by investigating the IWs variability. Namely, linear theory and a regional ocean model are used to quantify the different contributions from mesoscale variability.

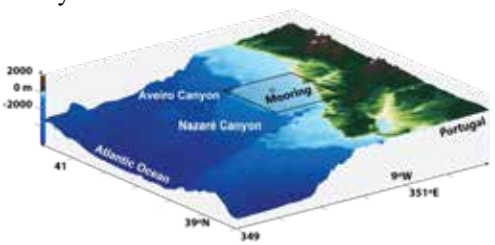


Fig. 1. Study region off the Portuguese coast between Aveiro and Nazaré canyons. The area covered by the SAR image in Fig. 2 is depicted in a black frame between the two canyons.

2. LINEAR THEORY

IWs in the ocean span across a wide range of time and spatial scales, and hence different theoretical models have been developed to describe them. In our study region (Fig. 1) IWs are mostly tidally generated (see e.g. Magalhaes et al., 2021). The barotropic tides result in interfacial IWs that propagate along the ocean's pycnocline (i.e. Internal Tides, ITs). ITs are known to steepen and disintegrate into isolate wave packets that also propagate along the ocean's pycnocline and are often referred to as Internal Solitary Waves (ISWs). In the remainder of this paper, we will use these

terms distinctively to refer either to the longer ITs with tidal frequencies or the shorter ISWs that are typically observed in satellite images.

ITs are essentially linear, which is our study region have semidiurnal wavelengths around 20 km (Fig. 2). ISWs are very different. They can be highly nonlinear and have much smaller scales down to few hundred metres. The mathematical models that govern these distinct dynamics are consequently very different. They are widely described in the literature (e.g. Grimshaw, 2002) and need not concern us here.

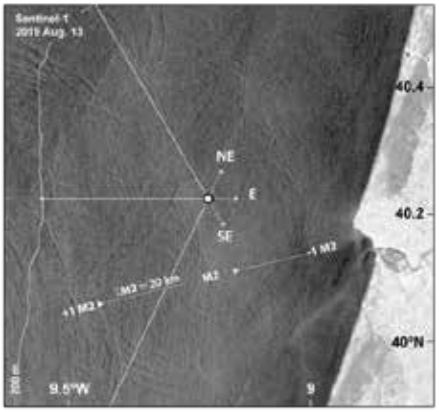


Fig. 2. SAR acquisition dated Aug. 13th, 2019, at 18:35 UTC (cf. Fig. 1), showing semidiurnal (i.e. M2) ISW packets propagating towards the southeast (SE), east (E) and northeast (NE). A moored thermistor chain is also shown in a white circle.

We are then left to the question which model is most suited to assess the IW variability sources. In this study we begin with a simpler approach and turn to linear models, which can convey the waves' main dynamical features, while still allowing for realistic background stratification and currents – which can change substantially in coastal systems (especially in the presence of upwelling) and hence paramount in interpreting the IWs' variability data. In Eq. 1 we use the Taylor-Goldstein (TG) equation which is assumed to govern linear IW motions (see more details in Gerkema and Zimmerman, 2008).

$$\frac{d^2\phi}{dz^2} + \left[\frac{N(z)^2}{(U(z)-c)^2} - \frac{\frac{d^2U(z)}{dz^2}}{U(z)-c} - k^2\right]\phi = 0, \phi(0) = \phi(-H) = 0 \quad (1).$$

Here ϕ is the vertical modal structure, k is the wavenumber representing the non-hydrostatic term, c is the wave's linear phase speed, H is the bottom depth, and N and U are the background Brunt-Väisälä frequency and velocity, which are shown as a function of depth and hence allowing for realistic representations of the ocean's stratification and shear.

Assuming N and U are known along the waves' propagation paths, Eq. 1 can be solved and phase speeds computed along the waves' trajectories. These phase speeds, in turn, can be integrated in time to the waves' arrival times at some reference position. In the present study we turn to the Regional Ocean Modeling System (ROMS, see Nolasco et al., 2013 and references therein), where we use daily solutions for N and U in our study region, with about 1/27° (around 3 km) in horizontal resolution, and sixty vertical levels that stretch in the vertical to provide good representations of the waves' media.

3. ISW VARIABILITY

Despite the longer variability scales in the ocean that affect IW systems, we seek to show that IW characteristics can change significantly in timescales around their typical propagation lifespans (a few days in our study region). We are also assuming that significant changes in IW fields observed over just a few days must come from their propagation conditions, and in turn from their propagation media (via Eq. 1).

Fig. 2 shows a SAR (Synthetic Aperture Radar) acquisition with several ISW packets propagating over the shelf with characteristic interpacket distances around 20 km. Three distinct directions of propagation are observed (Magalhaes et al., 2021): southeast (SE), east (E) and northeast (NE). Note that the ISWs' sea surface manifestations are assumed to be phase-locked within the troughs of the IT. Therefore, the interpacket distances in this image can be assumed as a proxy for semidiurnal IT wavelengths (i.e. λM2 as discussed in Section 2). Even though Fig. 2 represents a typical configuration of the main IW systems in this study region, these three main directions of propagation and their interpacket distances (or IT wavelengths) can change to some extent. This is not surprising since mesoscale variability will act to change the waves' background propagation conditions (e.g. Peliz et al., 2002; Relvas et al., 2007; Quaresma et al., 2007; Nolasco et al., 2013 and Oliveira et al., 2019).

Nevertheless, this IW variability revealed far greater than previously anticipated during the preparation stages for an oceanographic survey in 2019 (HABWAVE, https://habwave.rd.ciencias.ulisboa.pt/). In particular, a preliminary SAR desk study was performed to determine the waves' arrival times in reference to Low Water at a planned mooring location. Our expectations from previous works in nearby regions were of a variability of one to two hours around Low Water, which proved very different in just a few SAR images and effectively observed during the HABWAVE campaign in September 2019.

The HABWAVE survey included a moored thermistor chain to monitor ISWs close to the 100 m isobath (near 40.22 ◦N and 9.24 ◦W, see white dot in Figs. 1 and 2). This thermistor chain measured continuously for about 11 days (between 8th and 19th of September, 2019). These results are shown in Fig. 3 using vertically interpolated temperatures in a time series with a sample rate of about 30 seconds for the 14 °C isothermal (which sets a proxy for the local thermocline as done in Magalhaes et al., 2021).

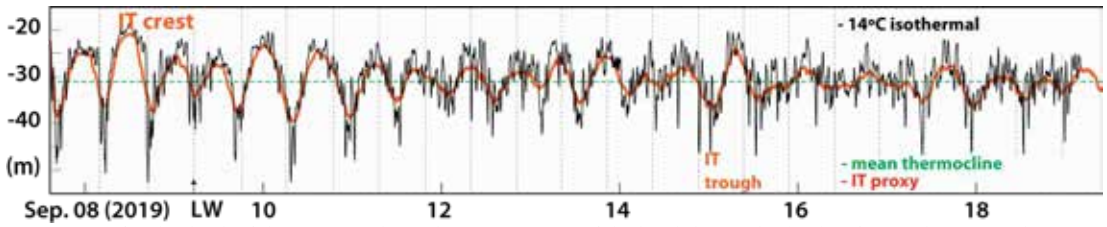


Fig. 3. Time series for the depth of the 14 °C isothermal (representative of the local thermocline) taken from a thermistor chain moored off the Portuguese west coast (white dot in Figs. 1 and 2). The green line represents a mean thermocline depth. Low Water (LW) is also indicated in each semidiurnal tidal cycle with a black dashed line. In red is a proxy for the IT. See text for more details.

According to Fig. 3, high-frequency ISW packets can be observed to propagate on the background of a mostly semidiurnal IT, with individual waves having periods of the order of tens of minutes. However the measurements seem to be divided in roughly two different regimes. First, stronger and clearer ISW packets can be identified before September 11th. Second, weaker ISWs seem to propagate in a less clear background after September 12th, whereas the two regimes shift close to September 11th.

A proxy for the IT can be computed by filtering the temperature time series around the semidiurnal tidal frequency (i.e. 12.42h). The filtered time series is highlighted in Fig. 3 in a red line, which confirms that the ISWs are generally phase-locked in troughs of the IT. Overall, the IT and the ISWs are seen to arrive around Low Water in the first 6 semidiurnal tidal cycles. After that, the amplitude of the IT decreases and its troughs quickly shift to High Water and hold there until September 15th. Beyond this day, the IT crests and troughs become too incoherent to identify unambiguously until about September 17th, after which both the IT and the ISW packets realign again around Low Water. This means that, in less than ten days of measurements, the IW variability in the waves' arrival times is seen to cycle through a full semidiurnal tide.

Nonetheless, this variability could simply result from the three distinct sources, whose individual contributions cannot be distinguished in the in situ data. Therefore, we are left to wonder which IW fields are contributing the most in Fig. 3. That is not possible to infer from the moored temperature record alone, and we proceed next to the theoretical background described in Section 2, which should provide leading order estimates for the individual variabilities in the different IW fields.

Fig. 4 presents an ensemble of travel-time plots computed from Eq. 1 (as described in Section 2, one line per day) for the same timeframe of the moored temperature records in Fig. 3. Given that Eq. 1 allows for separate contributions from stratification and currents, three distinct experiments are presented: Fig. 4a begins with a more realistic scenario with simultaneous contributions from N and U; whereas two other experiments assess them individually in Fig. 4b and 4c.

Overall, Fig. 4a shows different propagation dynamics for the three main directions of propagations. On average, E waves need only 1.5 semidiurnal tidal cycles to arrive at the mooring, which is approximately around High Water. NE waves also arrive around High Water but need more than double that time (≈4.5 M2), whereas SE ITs arrive at the opposite tidal phase (i.e. Low Water) and need roughly 2 semidiurnal tidal cycles. Their variability envelopes are seen to grow with increasing distances from their source locations, which is somewhat expected since longer propagation paths will inevitably lead to higher variability in propagation conditions.

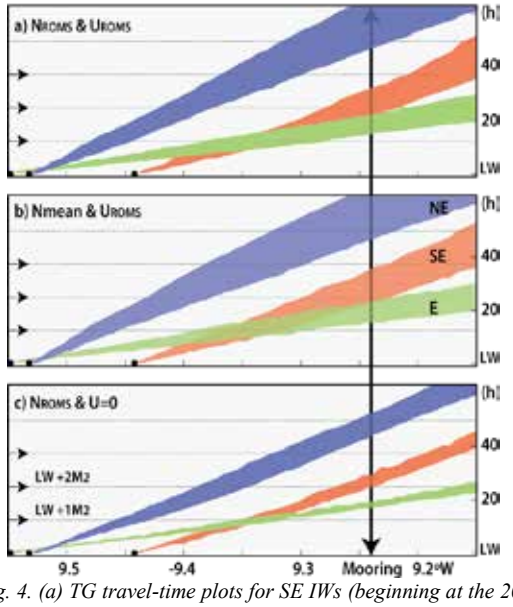


Fig. 4. (a) TG travel-time plots for SE IWs (beginning at the 200 m isobath in Fig. 2) during September (2019) using stratification and currents from a regional model solution (ROMS) off the west Portuguese coast. (b) Same as (a) but assuming a mean stratification for September. (c) Same as (b) but assuming there are no currents along the waves' propagation paths. The mooring is shown at 9.24°W (black arrow) and consecutive semidiurnal tidal cycles are indicated in horizontal dashed lines.

At the mooring, the vertical extent of the ensemble envelop can be regarded as a measure of the phase velocity variability when considering the contributions from stratification and currents in Eq. 1. This variability is comparable with a semidiurnal tidal cycle with E, SE and NE waves having variability envelopes roughly around 6, 12 and 14 hours (respectively). This means that they are of the same order as those in Fig. 3.

According to Fig. 4b and 4c, the variability resulting from background velocities (i.e. U in Eq. 1) is already enough to account for the variability seen in

Fig. 4a. This is consistent with the analyses in Jean and Sherwin (2001), which concluded that variability in IWs just north of our study region was mainly owing to wind driven currents, rather than changes in the stratification. Nonetheless, we note that in our case the variability in N (in Fig. 4c) is not negligible, just simply enclosed by that of U – and in fact the former amounting to about half of the latter.

4. DISCUSSIONS AND SUMMARY

Fig. 3 shows that IW variability in our study region can be of the same order of the waves' propagation spans. Therefore, while these results support those presented by Jeans and Sherwin (2001) and Nash et al. (2012), they provide evidence of much shorter timescale variability. In situ records cannot yield the individual variability of different IWs sources, and hence linear theory and a regional ocean model were used to highlight how typical mesoscale variability can influence the waves' variability scales. In essence, our results in Fig. 4 show that IW variability owing to changes in stratification is found to amount to about half of that in background flows, but its effect can go unnoticed within the largest contributions from mesoscale currents.

The implications are that processes relying in or resulting from ITs (and hence indirectly from the barotropic tide) will likely experience increased variability whenever the oceans' internal motions are a leading order governing parameter (e.g. via vertical velocities or diapycnal mixing) – whether they are physical, chemical, biological or geological in nature. Therefore, we believe that more research is needed to understand the full scales of IW variability and implications thereof, especially given that IWs are common features, and that their dynamics span several orders of magnitude across the ocean's timescales.

Acknowledgments

SAR images were provided by ESA's Sentinel Missions and are available online from https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home. Data from the regional ocean circulation model setup can be found here: http://gmo.web.ua.pt/thredds. This work was co-financed by the EU, through ERDF programs Lisbon Regional Operational Program (PORLisboa) and Portugal 2020, and by FCT/MCT national funds, within project LISBOA-01-0145-FEDER-031265. Jorge M. Magalhaes is supported by FCT – Portuguese Foundation for Science and Technology under contracts UIDB/04423/2020 and UIDP/04423/2020.

REFERENCES

Gerkema, T. and Zimmerman, J. T. F. An Introduction to Internal Waves. www.yumpu.com/en/document/view/4631323/an-introduction-to-internal-waves-nioz, (accessed January 15th, 2022) (2008).

Grimshaw. R. H. J. (Ed.): Environmental Stratified Flows, Topics in Environmental Fluid Mechanics, 282 pp., Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002.

Jeans, D .R. G., & Sherwin, T. J. (2001). The variability of strongly non-linear solitary internal waves observed during an upwelling season on the Portuguese shelf. Continental Shelf Research, 21, 1855–1878. https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00026-7.

Magalhaes, J.M., A.C. Pires, J.C.B. da Silva, M.C. Buijsman, P.B. Oliveira. 2021a. Using SAR imagery to survey internal solitary wave interactions: A case study off the Western Iberian shelf, Continental Shelf Research, Volume 220, 104396, https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104396.

Nash, J.D., E.L. Shroyer, S.M. Kelly, M.E. Inall, T.F. Duda, M.D. Levine, N.L. Jones, and R.C. Musgrave. 2012. Are any coastal internal tides predictable? Oceanography 25(2):80–95, https://doi.org/10.5670/oceanog.2012.44.

Nolasco, R., Pires, A. C., Cordeiro, N., Le Cann, B., and Dubert, J. (2013). A high-resolution modeling study of the Western Iberian Margin mean and seasonal upper ocean circulation. Ocean Dynamics, 63, 1041–1062. https://doi.org/10.1007/s10236-013-0647-8.

Oliveira, P. B., Amorim, F. N., Dubert, J. P., Nolasco, R., and Moita, T. (2019). Phytoplankton distribution and physical processes off NW Iberia during two consecutive upwelling seasons. Continental Shelf Research, 190. doi:10.1016/j.csr.2019.103987.

Peliz, Á., Rosa, T. L., Santos, A. M. P., and Pissarra, J. L. (2002). Fronts, jets, and counter-flows in the western Iberian upwelling system. Journal of Marine Systems, 35(12), 61–77. https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00076-3.

Quaresma, L. S., Vitorino, J., Oliveira, A., & da Silva, J. (2007). Evidence of sediment resuspension by nonlinear internal waves on the western Portuguese mid-shelf. Marine Geology, 246, 123–143. http://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.04.019.

Relvas, P., Barton, E. D., Dubert, J., Oliveira, P. B., Peliz, Á., da Silva, J. C. B., Santos, A. M. P. (2007). Physical oceanography of the western Iberia ecosystem: Latest views and challenges. Progress in Oceanography, 74, 149–173. http://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.04.021.

Evidence of upwelling separation from the coast off NW Portugal

P. Nunes (1), R. Nolasco (2), J. Dubert (2), V. Brotas (3), P. B. Oliveira (1)

(1) IPMA, Av. Alfredo Magalhães Ramalho, 6, Algés. pedro.nunes@ipma.pt

(2) CESAM - Dep. Física, Universidade de Aveiro

(3) MARE/FCUL - Lisboa, Portugal

Abstract: High-resolution satellite data and numerical model solutions are used to document the inner shelf circulation structure during a short upwelling event off NW Portugal in September 2019. A rare sequence of cloud free images of sea surface temperature (SST) and ocean colour show an upwelling cell separated from the coast during the intense wind phase. The signature of this off-coast upwelling core is particularly clear on the chlorophyll-a concentration (Chl-a) images, characterised by an alongshore strip of minimum Chl-a aligned with the maximum horizontal velocity divergence computed from the numerical model solutions. To the authors' acknowledgement, this is the first observational evidence of an upwelling cell separated from the coast off NW Portugal. Maximum divergence occurs close to the 30 m isobath, corresponding to Ekman layer thickness of about 50 m, according to the previous studies on the influence of topography on the cross-shelf structure of a wind-driven coastal upwelling.

Keywords: coastal divergence, Ekman layers, kinematic barrier.

1. INTRODUCTION

Off Northwest Portugal, coastal upwelling episodes occur during the summer months, driven by northerly wind intensification (*e.g.* Relvas et al., 2007). The winds blowing parallel to the shoreline force an offshore Ekman transport of the surface layers, creating the so-called coastal divergence. The coastal upwelling plays an important role in regulating the spatial and temporal distribution of nutrients and phytoplankton (Estrade et al., 2008). Previous studies carried out with different models have shown that the separation and displacement of the coastal outcrop front frequently occurs at some distance from the coast (Austin and Lentz, 2002; Estrade et al., 2008). One of the main factors of this separation is the shelf geometry. However, other factors, such as wind forcing and layer thickness should also be taken into account (Estrade et al., 2008). When the divergence is displaced from the coast, the cross-shore circulation is greatly reduced in the inner-shelf due to the interaction between the surface and bottom Ekman layers. In this way, there is a retention of biological material (phytoplankton cells, fish eggs and larvae), which means that there is no transport to the oceanic region, generating a nearshore region of high productivity (Estrade et al., 2008). Therefore, it is essential that the numerical models of ocean circulation are able to reproduce these features in order to explain the interaction between the physical and biological processes.

In this work, we focus on the first two weeks of September 2019, to match the period in which an oceanographic survey was carried out. High resolution satellite sea surface temperature (SST) and chlorophyll-a concentration (Chl-a) retrievals and numerical model solutions (oceanic and atmospheric) were used to reconstruct the relevant oceanographic processes during the coastal upwelling episode in NW Portugal (Figueira da Foz) that occurred prior to the survey. Satellite data was compared with the models to verify the existence of a realistic representation of the model for the spatial patterns of SST and Chl-a. The results of the horizontal divergence model allow the determination of the location and progression of the coastal upwelling over time and relate it to the patterns of SST and Chl-a.

2. DATA AND METHODS

2.1. Satellite data

Satellite data were obtained for the survey area (Fig. 2) and study period (first two weeks of September 2019), from three databases: Copernicus Online Data Access (CODA - https://coda.eumetsat.int/#/ home), Piscismod Portal (https://piscismod.eofrom. space/) and Ocean Colour Climate Change Initiative (https://www.oceancolour.org/portal/). Level 2 data from Sentinel-3 satellites (3A and 3B) were retrieved from CODA, namely the data from OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) at 300 m resolution (Water Full Resolution - WFR product) and from the SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer) sensor, with a resolution of 1 km (High-Resolution Sea Surface Temperature). From the Piscismod portal/database, the downloaded data was L3 data from Sentinel-3 (Iberia region), OLCI sensor, also with a resolution of 300 m. For the OC-CCI (Ocean Colour Climate Change Initiative), the data is obtained by merging several sensors (MERIS, MODIS Aqua, SeaWiFS LAC & GAC, VIIRS, and

OLCI - S3A), to produce a L3 product with a spatial resolution of 1 km.

2.2. *Wind data*

Wind speed data were obtained from the European Centre for Medium-range Weather Forecast – Integrated Forecasting System (ECMWF-IFS) with a spatial resolution of 10 km at 6 hourly intervals. The wind stress components (τ_x, τ_y) were computed using the same bulk formulation as Schwing et al. (1996).

2.3. *Oceanic circulation model*

The ocean simulations were computed using the CROCO-ROMS Regional Oceanic Modelling System. This is a split-explicit, 3D free-surface, sigma-coordinate model, developed for regional applications (see Shchepetkin and McWilliams, 2005 and references therein). CROCO-ROMS solves primitive equations using Boussinesq and hydrostatic vertical momentum balance. The model configuration consists in a two-way grid, similarly to that used in Nolasco et al. (2018), with horizontal resolutions of ~1.5 and ~0.5 km.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. *Wind forcing*

Two periods of strong northerly stress occurred in the beginning of September 2019, with absolute peak intensities of 0.15 and 0.25 Pa on the 5th and 11th, respectively (Fig. 1).



Fig. 1: Northerly wind stress component for September 2019, arrows indicate the dates of the images presented in Fig. 2.

3.2. *SST and Chl-a patterns*

The SST images for the 10th and 11th Sept. (Fig. 2, top) show the typical cross-shore thermal gradient resulting from the upwelling of cold subsurface waters and the presence of filamentous patterns. The image sequence from the beginning of the month (not shown) was characterised by successive upwelling and downwelling episodes, marked by the progression and regression of the upwelled waters, well represented in the model solutions (not shown). However, when comparing the model SST and the satellite retrievals in the coastal region, the model presents lower values. This appears to be a recurrent result and has been reported in previous works, e.g. Kuebel et al. (2006).

Regarding the effect of upwelling on biological productivity, previous studies have shown that the intensity of the wind forcing and its temporal variability is an important phytoplankton biomass driver (e.g. Yokomizo et al., 2010). The Chl-a and SST patterns are similar but with inverse trends, i.e. the cooler, nutrient-rich subsurface waters exhibit the highest concentrations of chlorophyll-a, in contrast to the oceanic region (e.g. Moita, 2001).

In the study region, and period under analysis, the spatial distribution of Chl-a, and its relationship with SST, varied considerably during the successive intensification and relaxation of the along-shore winds. During the most intense northerly winds there was a reversal in the SST and Chl-a spatial trends between the 30 and 50 m isobaths, i.e., there is a decrease in Chl-a accompanying the decrease in SST. These reversals vanish in the periods of wind relaxation.

On the Chl-a image of September 11th, an alongshore strip of low Chl-a concentrations were observed, associated with the strong wind stress, reaching absolute peak values of 0.25 N/m^2. The wind stress intensity appears to be key for this feature to be observed, as for low wind forcing values the low Chl-a concentration alongshore strip is not observed. Similar spatial trends in Chl-a and SST during peak wind intensity had also been observed in the paper by Oliveira et al., (2009), but their study was focussed on the Chl-a patterns around Cape Carvoeiro and Cape Roca, an area of complex coastal morphology.

3.3. *Coastal divergence*

As mentioned above, 10th and 11th of September 2019, correspond to the days of stronger wind stress. On these days, the distribution of the surface velocity divergence computed from the numerical model solutions provides a meaningful explanation for the observed low Chl-a concentration alongshore strips, recalling that the upwelling is more intense where maximum horizontal divergence occurs.

When comparing the chlorophyll-a concentrations with the horizontal divergence, the very low chlorophyll-a concentrations observed between the 9.00°W and 8.90°W matches the coastal divergence maximum. In addition, we can verify the displacement / progression of the maximum coastal divergence to the open ocean when comparing the two days. These results are in agreement with the results obtained by Estrade et al. (2008). These authors showed that the upwelling forced by along-shore winds can occur far from the coast, normally located in the isobath h ≈ 0.6D (D is the Ekman layer thickness). In their study off NW Africa, the maximum coastal divergence occurred near the isobath of 30 m which corresponded to an Ekman

layer thickness of 50 m. The areas of maximum divergence in the model solutions are observed between the 30 and 50 misobaths, indicating Ekman layer thicknesses in the 50–80 m range.

In the simulation carried out by Austin & Lentz (2002), it is shown that the cross-shore transport divergence progresses to offshore regions with the evolution of the coastal upwelling. Therefore, the maximum coastal divergence observed offshore agrees with the results of these authors. In this case, there is the formation of a coastal jet with a southward direction related to the upwelling of colder water masses.

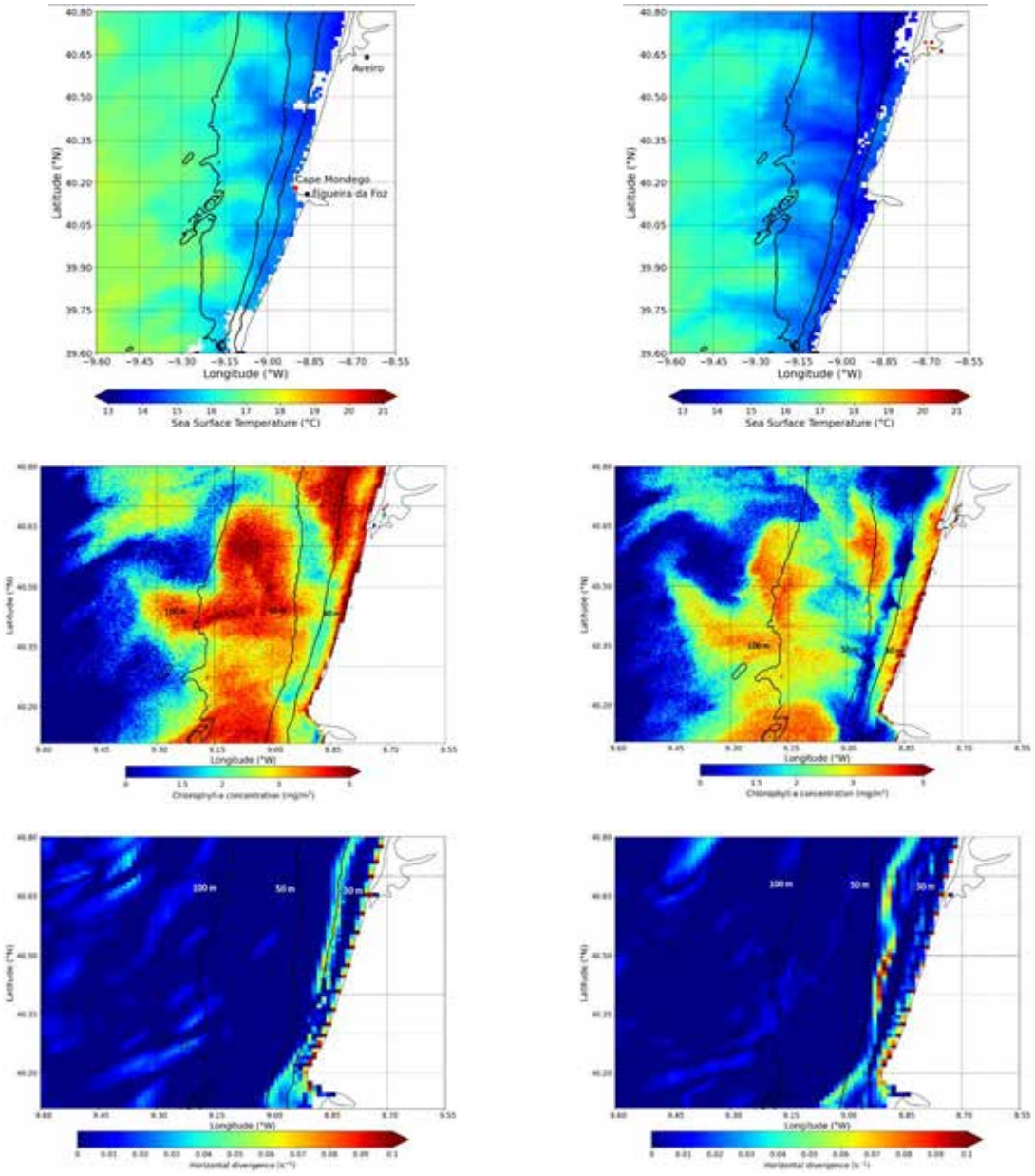


Fig. 2: SLSTR SST (top), OLCI Chl-a (middle), and ROMS surface velocity divergence (bottom) for the 10th (left) and 11th (right) of September of 2019 . The black lines represent the 30, 50 and 100m isobaths.

The formation of the coastal jet is justified by the maximum coastal divergence generating intense vertical movements in the water column (Austin & Lentz, 2002). This coastal jet is formed in response to the geostrophic balance with the upwelled isopycnals. The coastal jet can act as a kinematic barrier for offshore Ekman transport (Estrade et al., 2008), preventing the propagation of phytoplankton biomass to the oceanic region. Thus, it creates an "incubator" for phytoplankton biomass in the coastal region (Estrade et al., 2008).

CONCLUSION

This study is focussed on oceanographic processes with short/small time/space scales (days) that can only be properly assessed with high resolution (< 1 km) data and models. During the study period, an intermittent coastal upwelling associated with intensification and relaxation of the along-shore wind component was observed.

The spatial distribution of phytoplankton biomass follows the spatial distribution of sea surface temperature, however, there is an asymmetry between Chl-a and SST on 10th and 11th of September. This observed asymmetry is associated with an intensification of the wind forcing in those days.

The maximum coastal divergence responsible for the upwelling of subsurface waters occurred in the offshore region and not along the coast. The low chlorophyll-a concentration signal is related to the maximum coastal divergence and the southward coastal jet.

Acknowledgements

This work is a contribution to the project HabWAVE (PTDC/CTA-AMB/ 31265/2017) funded by FEDER, through COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI), and by national funds (OE), through FCT/MCTES, and to project iFADO (EAPA/165_2016) funded by European Union Atlantic Area Interreg Programme. Project Portugal Twinning for Innovation and Excellence in Marine Science and Earth Observation – PORTWIMS.

REFERENCES

Austin, J. A., & Lentz, S. J. (2002). The Inner Shelf Response to Wind-Driven Upwelling and Downwelling. *J Phys Oceanogr*, *32*(7), 2171–2193. doi: 10.1175/1520-0485(2002)032<2171:TISRTW>2.0.CO;2

Estrade, P., Marchesiello, P., De Verdière, A. C., & Roy, C. (2008). Cross-shelf structure of coastal upwelling: A two — dimensional extension of Ekman's theory and a mechanism for inner shelf upwelling shut down. J. Mar. Res.,66(5), 589–616. doi: 10.1357/002224008787536790

Kuebel Cervantes, B. T., & Allen, J. S. (2006). Numerical model simulations of continental shelf flows off northern California. *Deep-Sea Res Part II: Topical Studies in Oceanography*, *53*(25–26), 2956–2984. doi: 10.1016/j.dsr2.2006.07.004

Moita, M. T. (2001). Estrutura, variabilidade e dinâmica do Fitoplâncton na Costa de Portugal Continental. PhD Thesis, 273 pp.

Nolasco, R., I. Gomes, L. Peteiro, R. Albuquerque, T. Luna, J. Dubert, S. E. Swearer & H. Queiroga, (2018), Independent estimates of marine population connectivity are more concordant when accounting for uncertainties in larval origins, Scientific Reports, 8, 2641, doi:https://doi.org/10.1038/s41598-018-19833-w

Oliveira, P. B., Nolasco, R., Dubert, J., Moita, T., & Peliz, Á. (2009). Surface temperature, chlorophyll and advection patterns during a summer upwelling event off central Portugal. *Cont Shelf Res*, *29*(5–6), 759–774, doi: 10.1016/j.csr.2008.08.004

Relvas, P., Barton, E. D., Dubert, J., Oliveira, P. B., Peliz, Á., da Silva, J. C. B., & Santos, A. M. P. (2007). Physical oceanography of the western Iberia ecosystem: Latest views and challenges. *Progress in Oceanography*, *74*(2–3), 149–173. doi: 10.1016/j.pocean.2007.04.021

Schwing, F. B., O 'farrell, M., Steger, J. M., & Baltz, K. (1996). NOAA Technical Memorandum NMFS

Shchepetkin, A. F., & McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modelling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Model*, 9, 357-404. doi:10.1016/j.ocemod.2004.08.002

Yokomizo, H., Botsford, L.W., Holland, M.D. et al. (2010). Optimal wind patterns for biological production in shelf ecosystems driven by coastal upwelling. *Theor Ecol 3*, 53–63, doi: 10.1007/s12080-009-0053-5

Calibração de sensores hidro-oceanográficos da turbidez: gama de linearidade e homocedasticidade

A. Mendonça (1), D. Carinhas (1), V. Rodrigues (1), J. F. R. Leite (1)

(1) Instituto Hidrográfico. ana.mendonca@hidrografico.pt.

Resumo: O laboratório de calibração do Instituto Hidrográfico está a desenvolver um método de calibração nefelométrica de sensores hidro-oceanográficos de turbidez. A metodologia consiste na comparação de medições, entre o sensor a calibrar e os valores medidos num nefelómetro de referência, com recurso à regressão polinomial usando o método dos mínimos quadrados. Um dos pressupostos para a regressão simples é a existência de homocedasticidade (homogeneidade de variâncias) ao longo da gama de medição. Num estudo exploratório, verificou-se que a homocedasticidade só é conseguida entre os valores de turbidez de 1,6 NTU e 33 NTU. No entanto, quando se considera o coeficiente de variação, consegue-se homogeneidade para uma gama mais alargada. Como é necessário considerar uma gama com ordem de grandeza superior a 100 NTU, apresenta-se um estudo que avalia a possibilidade de se considerar a homogeneidade de coeficientes de variação em alternativa à homogeneidade de variâncias.

Palavras-chave: calibração, homocedasticidade, regressão, sensores hidro-oceanográficos, turbidez.

1. INTRODUÇÃO

No laboratório de calibração do Instituto Hidrográfico está em curso o estudo da aptidão de um nefelómetro de bancada a ser utilizado como equipamento de referência para a turbidez. Usualmente para a determinação do modelo de calibração, recorre-se à regressão polinomial com o método dos mínimos quadrados (MMQ), em que a soma dos quadrados dos resíduos da regressão é minimizada, para maximizar o grau de ajuste do modelo aos dados experimentais.

Um dos pressupostos para a sua aplicação é de que a variabilidade dos valores instrumentais é independente do valor da mensuranda (condição de homocedasticidade). Apesar de não ocorrerem desvios significativos nas estimativas pontuais de uma regressão, quando esta condição não é verificada, os respetivos resíduos podem ser erradamente estimados, levando a uma sobrestimação do coeficiente de correlação (Miller *et al.*, 2018).

Num estudo exploratório para a determinação da gama de calibração de acordo com a primeira versão da norma ISO 8466-1 (ISO, 1990), verificou-se que este pressuposto só se aplica a uma gama demasiado estreita, entre 1,6 NTU e 33 NTU, não abrangendo a gama de trabalho necessária para a calibração de sensores de aplicação oceanográfica (Mendonça, 2022a). De facto, este fator limitante foi um dos motivos que levou à sua reformulação para a segunda versão publicada recentemente, onde a verificação deste pressuposto já não constitui requisito para a sua aplicação (ISO, 2021). Ao contrário da anterior versão, a norma ISO 8466-1:2021, tem uma aplicação mais abrangente, remetendo a avaliação do desempenho de um método analítico para a norma ISO 11352, entretanto publicada (ISO, 2012).

No entanto, para métodos ainda não estabelecidos, sem histórico de dados de controlo analítico, torna-se útil o recurso aos dados de calibração para uma avaliação preliminar do seu desempenho. Por isso, a ISO 8466-1:2021 mantém no seu anexo A, a título informativo, as especificações relativas à estimativa de alguns parâmetros de desempenho, como por exemplo, o intervalo de confiança. Mas, para tal, o requisito de homocedasticidade deverá ser verificado.

Apesar desse requisito não ter sido verificado para a gama de trabalho pretendida, verificou-se uma homogeneidade nos coeficientes de variação (CV) ao longo dessa gama (Mendonça, 2022a). Com o presente estudo, pretende-se avaliar se o pressuposto relativo à homogeneidade de variâncias pode ser substituído pelo da homogeneidade de CV, outra medida de dispersão dos valores instrumentais de turbidez, mas ponderada relativamente à sua magnitude.

Essa avaliação é efetuada em dois passos. Primeiro, similarmente ao estudo de homocedasticidade, determina-se a gama de trabalho para a qual se observa homogeneidade nos CV. Posteriormente, nessa gama de trabalho, efetua-se um estudo comparativo entre o modelo de regressão pelo método dos mínimos quadrados simples ou ordinário (MMQO), em que não é efetuada qualquer ponderação para compensar a variação na dispersão dos valores instrumentais em função da mensuranda, e o método dos mínimos quadrados ponderado (MMQP) utilizado para compensar essa variação (Miller *et al.*, 2018; Magalhães, 2020).

2. MÉTODOS

2.1. Material e Reagentes

Os ensaios foram conduzidos sobre diluições de suspensões stock de formazina, com uma turbidez nominal de 4000 NTU, preparadas a partir de uma mistura de hexametilenotetramina e sulfato de hidrazina (pureza > 99,0%) em água ultrapura e desionizada (sistema *miliq*.), de acordo com o especificado na norma ISO 7027-1: 2016 (ISO, 2016). Os reagentes foram pesados numa balança analítica com resolução de 0,0001 g e as suspensões de formazina preparadas em material volumétrico de classe A ou AS.

O turbidímetro em estudo é um nefelómetro *HACH® TL2300*, com um intervalo de medição máximo de 0 NTU a 4000 NTU, onde a incerteza de medição máxima, associada à exatidão, é de 5%. Para esse intervalo de medição, o instrumento faz uma correção interna para a compensação de interferências óticas bastando, para tal, selecionar a opção de "taxa ligada" (HACH, 2021).

Este turbidímetro é rotineiramente calibrado com um conjunto de padrões primários de formazina *Stabcal®*, seguindo as instruções do fabricante (HACH, 2021). Essa calibração foi verificada, em cada dia de ensaio, com padrões secundários *Gelex®*.

2.2. Estudo de homoscedasticidade e homogeneidade de coeficientes de variação

Considerando estudos anteriores (Mendonça, 2022a, b), foram avaliadas duas gamas de trabalho: de 0,2 NTU a 450 NTU e de 2 NTU a 450 NTU. Para tal foram analisadas, em condições de precisão intermédia, dez alíquotas de suspensões diluídas de formazina, preparadas de forma a que tivessem valores de turbidez correspondentes aos valores nominais extremos das duas gamas de trabalho em estudo.

Para cada valor de turbidez, foram determinados os valores médios das leituras dadas para as dez alíquotas, bem como as respetivas variâncias e coeficientes de variação. Esses valores foram comparados e submetidos ao teste de significância *F* para verificação da sua semelhança (ISO, 1990).

2.3. Estudo de regressão linear pelos métodos dos mínimos quadrados ordinário (MMQO) e ponderado (MMQP)

Para a gama de trabalho em que se verificou uma homogeneidade de CV, foram avaliadas as respostas instrumentais, y_i , correspondentes a diferentes valores independentes de turbidez, x_i (Miller *et al.*, 2018; Ellison *et al*., 2009; Ferreira, 2020):

$$y_i = a + bx_i + e_i \qquad [1]$$

onde b é o coeficiente angular (sensibilidade instrumental) e a o coeficiente linear (leitura do instrumento na ausência de turbidez).

Para a determinação desses coeficientes, foram efetuadas leituras a 8 diluições independentes de uma suspensão stock de formazina, designadas por suspensões de trabalho. Cada suspensão de trabalho representa um valor de turbidez situado dentro da gama de trabalho em estudo. Para assegurar a normalidade na incerteza instrumental, foram lidas 3 alíquotas de cada suspensão de trabalho, sendo a sua média considerada como *yi*, nos pares de dados instrumentais (*xi, yi*), *com i = 1, 2, ..., n, ..., 8* (n ∈ N).

Na equação [1], $a + bx_i$ representa a resposta instrumental estimada através do modelo de calibração, $\hat{y}_i$:

$$\hat{y}_i = a + bx_i \qquad [2]$$

e o resíduo, e_i, a diferença entre a resposta medida e a estimada para a mesma amostra:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \qquad [3]$$

Os cálculos envolvidos no MMQO, para as estimativas dos coeficientes de regressão e respetivos intervalos de confiança, está extensamente exposto na bibliografia sobre química analítica instrumental e quimiometria (Miller *et al*., 2018; Ellison *et al*., 2009; Ferreira, 2020; Magalhães, 2020).

Para os cálculos de acordo com o MMQP, foi atribuída a cada ponto instrumental uma ponderação, w_i, inversamente proporcional à correspondente variância em *y*, s_i^2 , de acordo com a seguinte expressão escalonada para $n = 8$ pontos de calibração (Miller *et al.*, 2018):

$$w_i = \frac{s_i^{-2}}{\sum_{i=1}^{n} s_i^{-2}/_n} \qquad [4]$$

Os coeficientes angular e linear são então dados pelas expressões:

$$b_w = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i x_i y_i - n\bar{x}_w \bar{y}_w}{\sum_{i=1}^{n} w_i {x_i}^2 - n{\bar{x}_w}^2} \qquad [5]$$

$$a_w = \bar{y}_w - b\bar{x}_w \qquad [6]$$

Onde, $\bar{y}_w$e $\bar{x}_w$, determinados pelas expressões [7] e [8], adiante descritas, representam as coordenadas do centróide ponderado, através do qual a linha de regressão ponderada tem que passar, paralelamente ao caso do MMQO, em que a linha de regressão é forçada ao ponto centróide de coordenadas ($\bar{x}$, $\bar{y}$).

$$\bar{x}_w = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i x_i}{n} \qquad [7]$$

$$\bar{y}_w = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i y_i}{n} \qquad [8]$$

Os desvios padrão, associados às estimativas de regressão determinadas de acordo com as duas abordagens do MMQ, são calculados de acordo com as equações expressas na tabela I. Os parâmetros

envolvidos e a respetiva simbologia estão explicados na respetiva legenda e texto supra. Os intervalos de confiança, com 95% de probabilidade, para as estimativas de x_o e x_{ow} são, respetivamente, $x_0 \pm t_{(n-2)}s_{x_0}$ e $x_{0w} \pm t_{(n-2)}s_{x_{0w}}$.

Tab. I. Equações utilizadas para o cálculo dos desvios padrão associados às estimativas dos parâmetros de regressão, obtidas pelo método dos mínimos quadrados ordinário (MMQO) e ponderado (MMQP). w_i é o fator de ponderação, tal como definido pela expressão [4].$s_{y/x}$ e $s_{(y/x)w}$, representam os desvios padrão associados à regressão não ponderada e ponderada, respetivamente. s_{x_0} e $s_{x_{0w}}$, são os desvios padrão associados às estimativas do valor de turbidez numa amostra teste por interpolação à linha de regressão determinado pelos MMQO e MMQP, respetivamente. y_0 refere-se à média das m leituras instrumentais sobre a amostra teste. Os restantes parâmetros são definidos de acordo com o texto supra (Miller et al., 2018).

Método não ponderado (MMQO)		Método ponderado (MMQP)	
$s_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2}{n-2}}$	[9]	$s_{(y/x)w} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i(y_i-\hat{y}_i)^2}{n-2}}$	[11]
$s_{x_0} = \frac{s_{y/x}}{b}\sqrt{\frac{1}{m}+\frac{1}{n}+\frac{(y_0-\bar{y})^2}{b^2\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}}$	[10]	$s_{x_{0w}} = \frac{s_{(y/x)w}}{b}\sqrt{\frac{1}{w_0}+\frac{1}{n}+\frac{(y_0-\bar{y}_w)^2}{b^2\sum_{i=1}^{n} w_i x_i^2 - n\bar{x}_w^2}}$	[12]

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do teste de significância *F*, efetuado de acordo com ISO (1990), apresentam homogeneidade de CV para a gama de trabalho de 2 NTU a 450 NTU, embora não se verifique a condição de homoscedasticidade. Desta forma, os resultados de regressão, de acordo com os dois MMQ, aqui apresentados referem-se a essa gama de trabalho (figura 1).

Embora, de uma forma geral, a linha determinada pelo MMQO se pareça ajustar bem aos pontos experimentais (r = 0,99999), verifica-se que no extremo inferior da gama de trabalho se desvia desses pontos, levando a uma subestimação dos valores de turbidez. Esse desvio não se verifica quando o ajuste é feito pelo MMQP.

Repara-se ainda que o MMQO conduz globalmente a intervalos de confiança mais estreitos, o que se deverá a uma subestimação das incertezas associadas aos pontos experimentais.

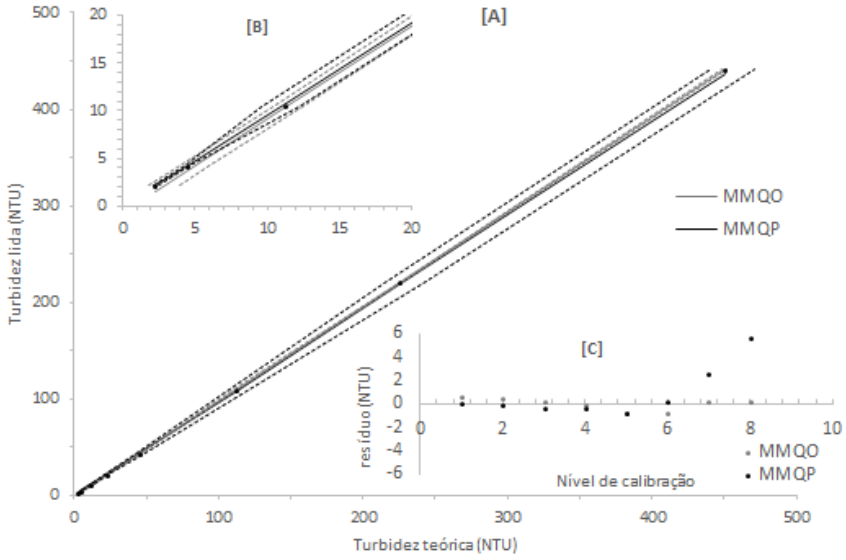


Fig. 1. [A] Gráfico de dispersão dos pontos experimentais, (xi, yi), resultantes da leitura de 8 suspensões de trabalho com valores de turbidez situados dentro da gama 2 NTU a 450 NTU (com incertezas desprezáveis relativamente à precisão instrumental). As duas linhas contínuas representam os ajustes de regressão pelos métodos dos mínimos quadrados ordinário (MMQO) e ponderado (MMQP). As linhas tracejadas representam os respetivos limites de confiança inferior e superior. Em [B] representa-se o mesmo gráfico, mas a uma escala inferior, para uma melhor visualização dos ajustes aos pontos de menores valores de turbidez. O gráfico [C] representa a dispersão dos resíduos, e_i, determinados pelos dois métodos de regressão.

No entanto, na região mais próxima do limite inferior da gama de trabalho, os intervalos de confiança do MMQP sofrem um estreitamento, tornando-se inferiores aos do MMQO.

De fato, é nos intervalos de confiança que as diferenças entre as duas metodologias se tornam mais evidentes. De uma forma geral, estes intervalos são mais estreitos próximo do ponto centróide. No

MMQO, o ponto centróide situa-se aproximadamente a meio da linha de regressão. Já no MMQP o ponto centróide desloca-se para os valores de mensuranda inferiores, de menores desvios padrão. Desta forma, é evidente que esta abordagem se torna mais fidedigna na análise de dispersão das estimativas de x_0, principalmente quando os resultados de interesse incluem aqueles com valores de turbidez mais baixos, como é o caso das águas oceânicas.

Por essa razão, com o MMQP o limite de quantificação pode ser aferido mais realisticamente através da estimativa do coeficiente linear, a_w, combinada com a incerteza associada à regressão ponderada. Devido à heteroscedasticidade, na região inferior da gama de trabalho o MMQO leva a uma sobrevalorização de $s_{y/x}$, conduzindo a uma sobrestimação do limite de quantificação (de 0,84 NTU, estimado pelo MMQP, passa para 5,0 NTU).

As diferenças relativas às incertezas estimadas pelos dois métodos, também são refletidas na análise de resíduos (figura 1C). Enquanto que os resíduos determinados pelo MMQO parecem ter uma distribuição aleatória em redor ao ponto nulo, quando a regressão é pelo MMQP verifica-se uma tendência crescente a partir do 7º nível de calibração, pelo menos. Tal fato, pode indiciar que a partir do respetivo valor de turbidez, a resposta instrumental já não terá uma relação linear com o valor da mensuranda, fato não traduzido pelo valor de r suprarreferido para o MMQO.

Todos estes resultados indicam que, apesar de se verificar uma homogeneidade de CV, na gama de trabalho considerada não será fidedigno aplicar o MMQO para a análise de desempenho instrumental relativo a uma resposta linear.

4. CONCLUSÃO

No âmbito da validação do turbidímetro *HACH TL2300* como nefelómetro de referência, avaliou-se a aplicabilidade da regressão simples para a analisar desempenho instrumental numa gama de trabalho que, apesar de ser heteroscedástica, possui homogeneidade nos CV.

Para tal, foi efetuado um estudo comparativo do método dos mínimos quadrados não ponderado (MMQO) com o ponderado (MMQP). Verificou-se que o MMQO, ao forçar a posição do centróide da linha de regressão para um valor médio da gama considerada, subvaloriza os respetivos resíduos de regressão, com resultado numa sobrevalorização do coeficiente de correlação. Como resultado, dá-se globalmente um falso estreitamento dos limites do intervalo de confiança dos valores estimados de turbidez.

Porém, na região inferior da gama de trabalho, onde os desvios padrão da resposta instrumental são mais baixos, esse estreitamento não é suficientemente realista para uma estimativa exata, verificando-se uma sobrestimação da incerteza de medição e a uma consequente sobrevalorização do limite de quantificação do método.

Estes resultados mostram que o CV não pode ser utilizado como parâmetro de avaliação da aplicabilidade da regressão linear simples.

REFERÊNCIAS

Ellison, S. L. R., Barwick, V. J., e Farrant, T. J. D. (2009). *Practical Statistics for the Analytical Scientist. A Bench Guide*. 2ª Edição. Royal Society of Chemistry. Cambridge. R.U.

Ferreira, M. M. C. (2020). *Quimiometria. Conceitos, Métodos e Aplicações.* Editora Unicamp. Campinas. Brasil.

HACH (2021). *Doc. 022.97.80533– TL2300. Manual Básico do usuário.* 5ª Edição.

ISO (1990). *ISO 8466-1: 1990 Water quality - Calibration and evaluation of analytical methods and estimation of performance characteristics. Part 1: Statistical evaluation of the linear calibration function.* International Standard Organization.

ISO (2012). *ISO 11352: 2012. Water quality — Estimation of measurement uncertainty based on validation and quality control data.* International Standard Organization.

ISO (2016). *ISO 7027-1: 2016. Water quality – Determination of Turbidity – Part 1: Quantitative methods.* International Standard Organization.

ISO (2021). *ISO 8466-1: 2021 Water quality - Calibration and evaluation of analytical methods - Part 1: Linear calibration function.* International Standard Organization.

Magalhães, W. F. (2020). Cálculo de incerteza de grandezas obtidas por regressão pelos métodos de mínimos quadrados de modelos físico-químicos linearizados, uma abordagem estatística e metrológica. *Revista Virtual de Química*, 12 (5), 000-000. Data de publicação na Web: 19 de agosto de 2020.

Mendonça, A. (2022a). *FOL T2/2022. Estudo da Homogeneidade de variâncias ao longo de uma gama de medição no LC-TUR-01.* Documento interno. Centro de Instrumentação Marítima-Instituto Hidrográfico.

Mendonça, A. (2022b). *FOL T1/2022. Estudo dos limites de deteção e de quantificação no LC-T-TUR-01.* Documento interno. Centro de Instrumentação Marítima-Instituto Hidrográfico.

Miller, J. N., Miller, J.C. e Miller, R. D. (2018). *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry.* Sétima edição. Pearson Education Limited. R.U.

Processamento de dados maregráficos – estação de Viana do Castelo

D. Carinhas (1), M. Alves (2), P. Infante (3), A. Martinho (4), F. Vasquez (2)

(1) Instituto Hidrográfico; IIFA/Universidade de Évora, dora.carinhas@hidrografico.pt.

(2) Instituto Hidrográfico.

(3) CIMA/IIFA e DMAT/ECT, Universidade de Évora.

(4) Escola Naval.

Resumo: A clássica questão da qualidade dos dados maregráficos tornou-se mais importantes na última década, pois surgiram novas tecnologias e as redes maregráficas foram modernizadas. Este trabalho permitiu avaliar não só o desempenho dos marégrafos da rede maregráfica, mas também apresentar técnicas de controle de qualidade para dados de marés registados em tempo quase-real que implica a necessidade de implementação de *software* automático de deteção e sinalização de erros. O controle de qualidade consiste na deteção de valores anómalos, atribuição errada de data e hora e cálculo de resíduos. Para avaliar o desempenho de medição dos equipamentos maregráficos, o teste de Van de Casteele foi revisitado. A validação das observações *in situ* do nível do mar foi baseada em procedimentos de controlo de qualidade sugeridos por normativos internacionais.

Palavras-chave: controlo de qualidade, maré, marégrafos, precisão, séries temporais.

1. INTRODUÇÃO

O Instituto Hidrográfico (IH) gere a maior rede de observações maregráficas nacional, operando e mantendo 23 estações maregráficas em cooperação com entidades públicas ou privadas.

O conhecimento da maré tem especial interesse em zonas costeiras, nomeadamente para a hidrografia e geodesia, segurança da navegação (em canais, estuários e portos), execução de projetos de engenharia costeira (como a construção de pontes, docas e quebra-mares), estudos de processos biológicos e geológicos, estudos de alterações climáticas e ainda para atividades recreativas e pesca (Pugh, 1987).

As questões relacionadas com a qualidade das medições de maré tornaram-se mais importantes com a modernização dos equipamentos e as recentes preocupações com o aumento do nível médio do mar.

Assim, nas últimas décadas, muita atenção tem sido dada ao desempenho da maré, especialmente no contexto do programa GLOSS (IOC, 1997; Merrifield *et al.*, 2010).

No entanto, sistemas capazes de armazenar e transmitir grandes quantidades de dados permitem que marégrafos monitorizem de forma rigorosa fenómenos interessantes como ondas de tempestade ou tsunamis. Como resultado do crescente interesse em dados do nível do mar de maior qualidade e maior frequência, as redes de monitorização maregráfica têm sofrido desenvolvimentos técnicos significativos. Os tradicionais medidores de flutuadores mecânicos foram, progressivamente, substituídos por medidores de maré eletrónicos equipados com sensores acústicos, de pressão e, mais recentemente, de radar. Durante este processo, testes de comparação foram realizados e os seus resultados foram publicados (Woodworth e Smith, 2003). Segundo Martin *et al.* (2005), os métodos clássicos aplicados para analisar os dados de tais equipamentos (incluem técnicas como:

(i) cálculo de diferenças entre as medições do equipamento e a medição padrão ou de referência na análise de séries temporais;

(ii) cálculo da raiz do erro quadrático médio (rmse) da série temporal das diferenças;

(iii) visualização dos dados de um equipamento maregráfico contra outro (gráfico de dispersão) e;

(iv) cálculo da inclinação da tendência de regressão linear entre as duas séries do nível do mar; esta inclinação expressa as sensibilidades distintas dos medidores para a amplitude das marés.

Este interesse pela qualidade das medições de maré também está patente na página da UNESCO/IOC (www.ioc-sealevelmonitoring.org), no qual 25% dos marégrafos exibidos usam tecnologia de radar.

No entanto, devido à incorporação, relativamente recente, desses sensores modernos nas redes maregráficas, ainda há falta de informações sobre o seu comportamento de longo prazo e a sua adequação para se estimar as tendências do nível do mar. A maioria dos testes de comparação mencionados acima usaram dados horários para determinar se os marégrafos atendem aos requisitos de precisão de 1 cm, referenciados pelo GLOSS (IOC, 1997), mas não avaliaram a fiabilidade dos dados de alta frequência (significando um intervalo de amostragem de alguns minutos) ou a estabilidade a longo prazo dos sensores.

Neste trabalho, abordaremos essas questões, utilizando dados de dois equipamentos maregráficos de radar, com medições simultâneas do nível do mar. Apresentamos uma série de técnicas de comparação de dois sistemas de medição para avaliar se os marégrafos instalados no porto de Viana do Castelo são comparáveis.

2. QUALIDADE DAS MEDIÇÕES

Desde 2015, estão a ser registadas, em simultâneo, as alturas das marés em dois marégrafos radar instalados na mesma estação maregráfica localizada no porto de Viana do Castelo; a localização e os registos de marés, de minuto a minuto, entre os dias 1 e 2 de setembro de 2021 são mostrados na Figura 1.

Diariamente, os registos maregráficos em tempo quase real, passam por um controlo de qualidade (QC). O *software* de controlo de qualidade, desenvolvido e implementado no IH, tem como objetivo identificar, precocemente, registos incorretos e de mau funcionamento dos equipamentos maregráficos, criando uma série temporal de dados maregráficos com sinalização de qualidade.

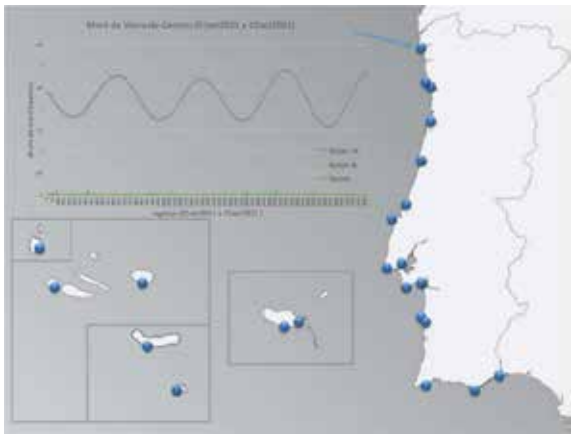


Fig. 1. Rede Maregráfica Nacional (fonte: Instituto Hidrográfico).

Na Figura 2 é apresentado o fluxograma do *software* implementado.

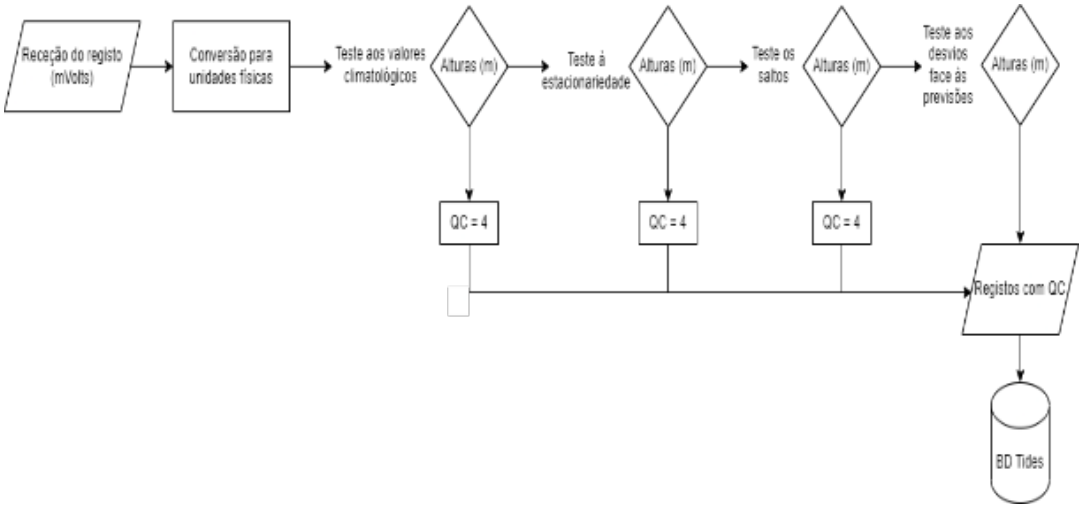


Fig. 2. Fluxograma do software implementado no IH.

A Tabela I apresenta a legenda da sinalização dos registos (EuroGOOS, 2010):

Tabela I: Indicadores do controlo de qualidade (QC).

Indicadores	Designação
0	Sem controlo de qualidade
1	Valor bom
2	Provavelmente valor bom
3	Provavelmente valor mau
4	Valor mau

A Figura 3 apresenta a série temporal com a sinalização de qualidade aplicada.

Time	Alt(m)	QAlt
2021-09-08 11:47:00	1.7546	1
2021-09-08 11:48:00	1.7655	1
2021-09-08 11:49:00	1.7839	1
2021-09-08 11:50:00	1.7956	1
2021-09-08 11:51:00	1.8161	1
2021-09-08 11:52:00	1.8321	1
2021-09-08 11:53:00	1.8507	1
2021-09-08 11:54:00	1.8707	1
2021-09-08 11:55:00	1.8882	1
2021-09-08 11:56:00	1.9011	1
2021-09-08 11:57:00	1.9154	1
2021-09-08 11:58:00	1.9167	1
2021-09-08 11:59:00	1.9279	1
2021-09-08 12:00:00	1.9356	1
2021-09-08 12:01:00	1.9453	1
2021-09-08 12:02:00	1.9589	1
2021-09-08 12:03:00	1.9685	1
2021-09-08 12:04:00	1.9823	1
2021-09-08 12:05:00	1.9963	1
2021-09-08 12:06:00	2.0079	1
2021-09-08 12:07:00	2.0220	1

2021-09-09 14:57:00	3.6938	2
2021-09-09 14:58:00	3.6344	1
2021-09-09 14:59:00	3.6958	2
2021-09-09 15:00:00	3.8543	2
2021-09-09 15:01:00	3.8319	2
2021-09-09 15:02:00	3.8241	2
2021-09-09 15:03:00	3.9068	2
2021-09-09 15:04:00	3.9495	4
2021-09-09 15:05:00	3.9025	2
2021-09-09 15:06:00	3.8667	2
2021-09-09 15:07:00	4.0044	4
2021-09-09 15:08:00	3.8266	2
2021-09-09 15:09:00	3.8645	2
2021-09-09 15:10:00	3.7979	2
2021-09-09 15:11:00	3.9669	2
2021-09-09 15:12:00	4.0657	4
2021-09-09 15:13:00	4.2785	4
2021-09-09 15:14:00	3.8287	2
2021-09-09 15:15:00	4.3388	4
2021-09-09 15:16:00	4.2774	4
2021-09-09 15:17:00	4.4660	4
2021-09-09 15:18:00	4.4587	4
2021-09-09 15:19:00	4.1901	4

Fig. 3. Série temporal do equipamento maregráfico Radar-B (da estação de Viana do Castelo) com sinalização de qualidade.

O *software* tem incluído uma ferramenta de visualização que permite validar e apresentar o QC da série de registos maregráficos (Figura 4).

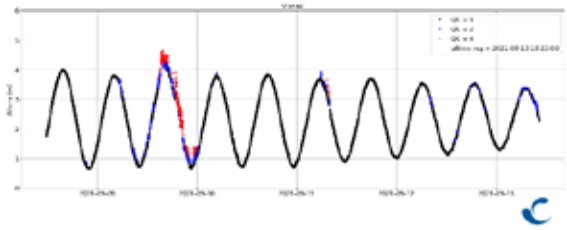


Fig. 4. Deteção e sinalização de registos anómalos do equipamento maregráfico Radar-B (da estação de Viana do Castelo).

As diferenças (ou desvios) entre os dois equipamentos foram calculadas e representadas num histograma (Figura 5) para avaliar a sua distribuição. Existe evidência gráfica de que a distribuição dos desvios é assimétrica negativa, confirmada com o coeficiente de assimetria de -1.58.

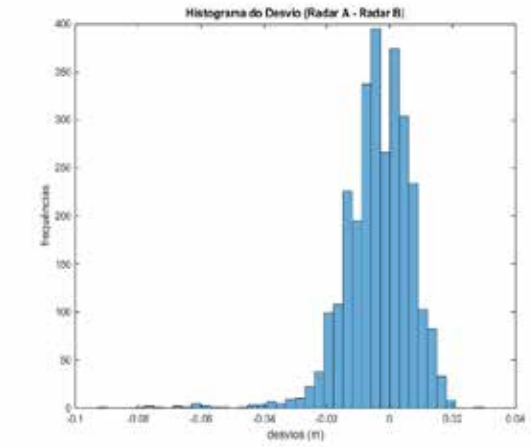


Fig. 5. Histograma dos desvíos entre os marégrafos.

A diferença das medições apresenta um desvio médio de 0.81 cm (em valor absoluto) com desvio-padrão de 0.77 cm.

Foi construído o gráfico de dispersão e encontrado o declive da regressão linear (Figura 6).

A regressão linear permitiu definir a equação: $\widehat{RadarA} = 1.0029 \times RadarB - 0.0102$.

Um coeficiente de correlação de $R = 0.9996$ é evidência de uma forte relação entre as medições dos dois equipamentos, ou seja, os dois marégrafos são rigorosos, mas não precisos entre si.

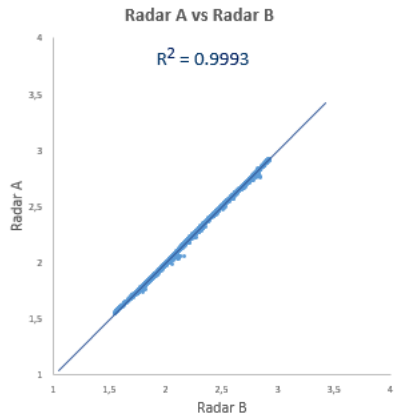


Fig. 6. Declive da reta de regressão linear entre as medidas dos marégrafos radar ($\widehat{RadarA} = 1.0029 \times RadarB - 0.0102$).

O teste de Van De Casteele foi concebido, em 1962, para avaliar o desempenho da mecânica de marégrafos com flutuadores. O GLOSS, em 1985, recomendou a sua aplicação a todos os tipos de equipamentos, de forma a comparar as leituras entre uma sonda manual e as leituras dos marégrafos, em diferentes ciclos de maré. Os resultados são utilizados para produzir um gráfico com o nível do mar no eixo dos *yy* e as diferenças no eixo dos *xx* (Lennon, 1968). A sonda manual é usada como instrumento de referência assumindo que as suas medições são mais precisas do que as do equipamento a comparar (IOC, 1985; Le Roy, 2006). Os resultados também dependem da habilidade do operador da sonda manual, por isso, erros humanos não podem ser totalmente descartados.

Neste trabalho foi aplicado o teste Van de Casteele com o objetivo de comparar as medições dos dois equipamentos maregráficos; o equipamento de Radar A é considerado o equipamento principal da estação maregráfica; os resultados foram utilizados para produzir um gráfico com a medida do nível da maré no eixo das ordenadas e as diferenças (ΔH) no eixo das abcissas: $\Delta \mathrm{H} = \mathrm{Radar\ A} - \mathrm{Radar\ B}$.

A Figura 7 apresenta os resultados da aplicação do Teste de Van de Casteele aos marégrafos radar.

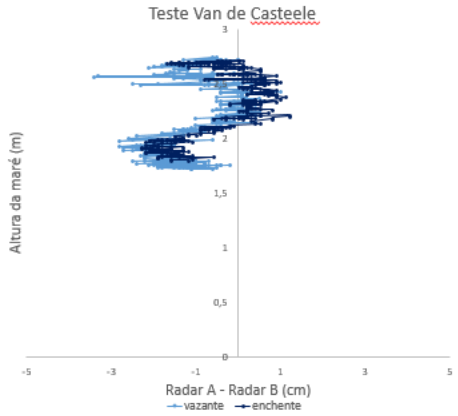


Fig. 7. Aplicação do Teste Van de Casteele.

Este teste confirma os resultados obtidos através do estudo da regressão e coeficiente de assimetria.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por objetivo apresentar uma avaliação das medições de alturas de maré, entre dois equipamentos instalados na mesma estação maregráfica (Viana do Castelo).

A implementação de *software* automático de deteção e sinalização de erros demonstrou ser uma mais valia na monitorização dos registos maregráficos em tempo quase real, o que permite uma ação mais rápida e eficaz, normalmente, em situação de tempestade.

O controlo de qualidade, desenvolvido no IH, consiste na deteção de registos anómalos, desvios na data e hora e cálculo de resíduos (diferença entre previsões e observações).

O teste de Van de Casteele foi revisitado para diagnosticar se os registos de alturas de maré são capazes de satisfazer os requesitos da GLOSS e demonstrou ser uma ferramenta útil na avaliação da precisão dos marégrafos.

Os métodos clássicos foram aplicados aos dados e permitiram encontrar um desvio médio de ~ 0.81 cm, em valor absoluto, entre observações registadas minuto a minuto.

Apesar dos resultados satisfatórios para a maioria das aplicações da monitorização de marés (por exemplo obras portuárias) o desvio, em algumas medições, é maior do que o desejável, 1 cm, o que poderá afetar estudos de tendência do nível médio do mar.

A análise da precisão e da exatidão das observações nunca está terminada, assim há que continuar a comparar medições e avaliar as variações dos desvios após remover as constituintes harmónicas e comparar as constantes harmónicas obtidas, em cada registo maregráfico, após um ano de dados.

Como trabalho futuro, estamos a desenvolver uma técnica, para o tratamento analítico e estatístico adequado, cujo objetivo é a obtenção de soluções para o cálculo do período de inspeção que minimiza o número de falhas da estação maregráfica.

REFERÊNCIAS

EuroGOOS DATA-MEQ Working Group (2010). Recommendations for in-situ data Near Real Time Quality Control. EG10.19

Foreman, M. G. G. (1977). Manual for tidel heights analysis and prediction. Patricia Bay, Sidney, B.C: Institute of Ocean Science, (Pacific Marine Science Reports 77-10).

IOC. (1985). Manual on sea-level measurement and interpretation. Volume I: Basic procedures. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals & Guides 14, 84 pp.

IOC. (1997). Global Sea Level Observing System (GLOSS) - Implementation plan. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Technical Series No. 50, 91 pp & annexes.

Lennon, G. W. (1968). The evaluation of tide gauge performance through the Van de Casteele test. Cah. Oceanogr., 20 ,867-877.

Le Roy, R., 2006: Evaluation des télémètres radar pour la mesure des hauteurs d'eau (Assesment of the radar sensors for the measurement of the sea level). EPSHOM, Rapport d'étude 001/06, 49 pp.

Martín B., Pérez B., Álvarez Fanjul E. (2005). The ESEAS-RI sea level test station: reliability and accuracy of different tide gauges. Int. Hydrogr. Rev. 6: 44-53. E. Alvarez Fanjul B. Martín, B. Pérez. The eseas-ri sea level test station: reliability and accuracy of different tide gauges. Int. Hydrogr. Rev, 6:44-53, 2005.

Merrifield M., Aarup T., Allen A., Aman A., Bradshaw E., Caldwell P., Fernandes R.M., Hayashibara H., Hernandez F., Kilonsky B., Martin Miguez B., Mitchum G., Pérez Gómez B., Rickards L., Rosen D., Schöne T., Szabados M., Testut L., Woodworth P., Wöppelmann G., Zavala J. (2010). The Global Sea Level Observing System (GLOSS). In: J. Hall, D.E. Harrison and D. Stammer (eds.), Proceedings of the "OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society" Conference (Vol. 2), Venice, Italy, 21-25 September 2009. ESA Publication WPP-306 (in press).

Pugh, D. T. (1987). Tides, Surges and Mean Sea Level. Wiley.

Woodworth P.L., Smith D.E. (2003). A one-year comparison of radar and bubbler tide gauges at Liverpool. Int. Hydrogr. Rev. 4: 2-9.

Agitação marítima em Portugal: 40 anos de dados

R. Esteves (1), J. P. Pinto (1), E. Craveiro (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Marinha Portuguesa, Rua das Trinas, 49 – 1249-093 Lisboa, +351.210.943.052, rita.esteves@hidrografico.pt, paulo.pinto@hidrografico.pt

Resumo: O Instituto Hidrográfico (IH), em colaboração com diversas instituições, tem mantido em funcionamento a rede de boias ondógrafo costeira, desde 1980 até à atualidade. A aquisição de dados de agitação marítima teve o seu início com o projeto ONDMAR e é atualmente parte integrante do projeto MONIZEE (Sistema de Monitorização Operacional da ZEE Portuguesa). Apresenta-se nesta comunicação uma caracterização do clima da agitação marítima, com base nos dados adquiridos pela boia ondógrafo de Leixões, Figueira da Foz, Sines e Faro entre 1980 e 2020. A homogeneidade da série é testada, utilizando o software RHtest e são calculadas as tendências para cada um dos pontos de observação. São caracterizadas as condições médias globais e as condições médias sazonais.

Palavras-chave: agitação marítima, boias ondógrafo, climatologia.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas cinco décadas foram realizados vários estudos sobre a variabilidade do clima de ondas na margem Este do Atlântico Norte (MEAN) recorrendo a diferentes fontes de dados. Os resultados gerais dessas investigações concluem que durante os últimos 100 anos não se encontrou nenhuma mudança climática significativa ao longo da MEAN, seja a partir de registos visuais, dados in-situ ou de reconstrução do campo de ondas. [Gulev e Grigorieva, 2004; Grupo WASA, 1998]. Os estimadores de altura de onda são caracterizados por variabilidade interanual a decadal-multidecadal com uma tendência ascendente observada apenas durante as últimas 5 décadas em latitudes entre os 45º e 65º N [Walden *et al.*, 1970; Neu, 1984; Bacon e Carter, 1991; Bouws *et al.*, 1996; Gunther *et al.*, 1998] e cujas causas, sejam naturais ou antropogénicas ou ambas, não são totalmente compreendidas. Outras investigações, baseadas na reconstrução do clima de ondas, simulação de modelos de ondas espetrais forçados por reanálises de campos de vento e dados de satélite, mostram que parte da variabilidade associada à agitação marítima está correlacionada com o índice NAO [Wang e Swail, 2001; Dodet et al., 2010; Izaguirre et al., 2011]. Por outro lado, observações in-situ realizadas em latitudes abaixo dos 45ºN não evidenciam correlação significativa entre as alturas de onda e a NAO e não revelam uma tendência clara e conclusiva nos respetivos estimadores estatísticos [Dupuis et al., 2006].

O principal objetivo desta comunicação é complementar os estudos já realizados na margem leste da bacia do Atlântico Norte, disponibilizando informação in situ relevante sobre a evolução do clima de ondas. A rede de bóias ondógrafo mantida pelo IH desde 1980 tem sofrido diversas atualizações ao longo do tempo com modificações ao nível do tipo de casco, carga útil, sensores e sistemas de processamento. Estas alterações pontuais causam eventualmente mudanças bruscas no registo temporal que podem adulterar as análises climatológicas de longo termo introduzindo erros no cálculo de tendências e valores médios. Para identificar a potencial ocorrência destas não homogeneidades e proceder ao ajuste destes registos foi usado o programa RHTestsV4 [Wang and Feng, 2009] sobre as séries das médias mensais de altura significativa.

2. BOIAS ONDÓGRAFO

O Instituto Hidrográfico (IH), em colaboração com diversas instituições, tem mantido em funcionamento a rede de boias ondógrafo costeira, desde 1980 até à atualidade. A aquisição de dados de agitação marítima teve o seu inicio com o projeto ONDMAR e é atualmente parte integrante do projeto MONIZEE (Sistema de Monitorização Operacional da ZEE Portuguesa). A rede de boias ondógrafo, em Portugal Continental, é atualmente constituída pela boia de Leixões, Sines e Faro, mantidas em colaboração com a APDL (Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, SA) e a APS (administração dos Portos de Sines e do Algarve SA). A boia instalada na Figueira da Foz entre 1981 e 1996, embora já tenha sido desativada, a informação recolhida continua a ser de maior importância para análise da agitação marítima na costa portuguesa. No presente estudo são utilizados os dados das boias de Leixões, Figueira da Foz, Sines e Faro, desde a sua instalação até dezembro 2020. Na tabela I, apresenta-se a localização de cada uma das estações, a sua profundidade e a data de inicio e final de aquisição de dados com boias não-direcionais e direcionais. Atendendo à proximidade entre a boia de Leixões e da Figueira da Foz, à batimetria local, bem como à semelhança no regime de agitação marítima em ambos os locais (sustentada nos resultados obtidos com registos simultâneos que cobrem um período de

2 anos e 7 meses e que apresentam um viés de $-0.04\,m$ e um desvio normalizado de 13%), combinou-se as séries temporais das duas boias de forma a estender a série temporal de 1981 a 2020. A série conjunta de Figueira da Foz e Leixões é designada nesta comunicação por FigLe.

Boias	Localização	Prof.	Não-Dir	Dir
Leixões	41°19.00'N 08°59.00'W	83	--	07/1996 - 12/2020
Fig. da Foz	40°11.133'N 09°08.733'W	92	06/1981 - 03/1990	07/1990- 02/1996
Sines	37°55.267'N 08°55.733'W	97	02/1980 - 05/1988	05/1988 - 12/2020
Faro	36°54.283'N 07°53.900'W	93	--	09/1986 - 12/2020

Tabela I – Informação sobra as boias ondógrafo

3. HOMOGENEIDADE DOS DADOS

O teste de homogeneidade é aplicado em cada estação com a restrição de apenas considerar valores médios mensais de altura significativa $\overline{H_{m0}}$ válidos em meses com cobertura de dados superior a 60%. Neste esquema são definidos dois tipos de desvios; desvios que são estatisticamente significativos apenas se forem suportados por registos históricos (tipo 0) e desvios que são estatisticamente significativos mesmo na ausência de registos que os fundamentem (tipo 1). Nesta análise apenas foram considerados desvios do tipo 1. Esta ferramenta tem sido utilizada com sucesso em trabalhos anteriores na homogeneização de registos de bóias ondógrafo [Thomas and Swail, 2009; Gemmrich *et al.*, 2011]. As séries temporais de FigLe, Sines e Faro foram testadas para a sua homogeneidade usando o programa RHTestV4 e não foram detetados desvios, significando que as três séries são homogéneas.

Para aumentar a sensibilidade e fiabilidade da deteção de desvios médios nas séries temporais de $\overline{H_{m0}}$, foram consideradas no RHTestsV4 séries de referência H_{ref} extraídas da reanálise ERA5 nos pontos da malha computacional mais próximos das localizações das estações ondógrafo. Neste esquema o F Test é usado para detetar pontos de mudança desconhecidos na série temporal dos dados base menos dados de referência (BmR) $\overline{\Delta H_{m0}} = \overline{H_{m0}} - H_{ref}$, e o teste t Student para testar a significância de pontos associados a mudanças conhecidas [Wang, 2007, 2008]. A homogeneidade de H_{ref} foi verificada tendo-se detetado um ponto de alteração no registo de Sines e FigLe em junho e fevereiro de 2003, respetivamente. É possível justificar parcialmente este desvio tendo em conta o número de dados assimilados no ERA5. Estes aumentaram de 0.75 milhões por dia em 1979 para 24 milhões por dia em 2019 com descontinuidades relevantes que podem influenciar o desempenho da reanálise do clima de ondas como por exemplo as observações de H_{m0} que apenas começaram a ser incluídas em 1991 e que duplicaram em média em 2003 [Hersbach *et al.*, 2020], precisamente o ano onde se detetou pontos de mudança em H_{ref}. No entanto estes pontos não são estatisticamente significativos tendo-se optado por não ajustar as séries de referência.

Desvios estatisticamente significativos de tipo 1 ocorreram em todas as três estações ondógrafos usando as respetivas séries de referência. Em Sines (ver Figura1) foram identificados dois pontos de mudança, em mar1991 e jan2002, que definem um segmento intermédio de uma década caracterizado por um desvio médio negativo onde a percentagem de dados mensais válidos é menor que nos restantes períodos de observação. Nas bóias de Faro e FigLe apenas se deteta um ponto de mudança em fev1992 e ago1988, respetivamente.

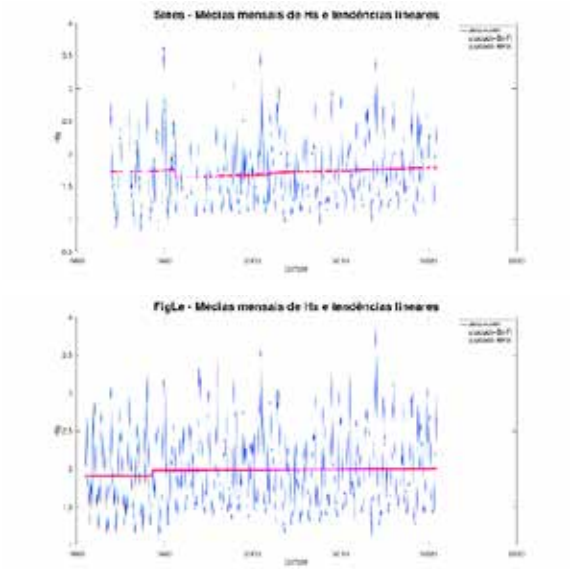


Figura 1 – Série base de alturas significativas mensais (preto) e séries de alturas significativas mensais ajustadas com base nos desvios calculados pela BmR (azul) e BmR+BmS (ciano). Tendência linear por segmento e respetivos desvios: BmR (vermelho) e BmR+BmS (magenta)

Em todas as estações se detetou um ponto de mudança entre o final da década de 80 e o inicio da década de 90 do século passado, que no caso de FigLe e Sines coincide aproximadamente com a transição entre as bóias WAVERIDER não-direcional e a WAVEC direcional. Apesar das bóias serem ambas da Datawell existem alterações na forma do casco e na carga útil que poderão ter contribuído para a não homogeneidade encontrada. Em Faro não ocorreu esta transição. A bóia utilizada desde o inicio do registo até 2000 foi a WAVEC direcional.

A falta significativa de dados no registo de Sines - logo após o primeiro ponto de mudança - poderá ser a causa desta discordância e até em parte a justificação para a deteção da não homogeneidade. Tal como em Sines, o registo de Faro apresenta uma falha de dados significativa após o ponto de mudança.

3.1. Tendência

Na tabela II são apresentadas as tendências em mm/ano nas três estações ondógrafo em análise; sem considerar as correções eventualmente associadas a não homogeneidades nos dados identificadas pela ferramenta RHTestsV4 (coluna 1) e considerando as correções determinadas com base na série de referência e adotando o ajuste que se encontra implementado por defeito no programa (coluna 2).

Tabela II. Informação das boias

Tendencia (mm/ano)	$\overline{H_{m0}}$	$\overline{H_{m0}}/H_{ref}$	H_{90}
FigLe	2.9	1.2	3.7
Sines	2.2	5.8	1.8
Faro	-1.3	-0.7	-5.7

Neste procedimento de ajuste é assumido que as observações mais recentes são mais precisas. Na terceira coluna é apresentada a tendência do percentil 90 (H_{90}) das séries tri-horárias de altura significativa sem ajuste. Estes valores quantificam as tendências dos eventos mais extremos. Todos os ajustes lineares foram estimados através do método dos mínimos quadrados. Os valores da coluna 1 e 2 são obtidos após remoção do sinal sazonal.

Os valores das tendências obtidos a partir das observações sem correção variam entre 2.9 a $-1.3\ mm/ano$. Os resultados entre as diferentes estações são geograficamente consistentes. Na costa oeste de Portugal Continental a tendência das alturas significativas mensais é positiva e diminui para sul. Na costa do Algarve, mais a sul e com uma orientação diferente, a tendência observada é negativa. Os valores de tendência estimados com base nas séries mensais corrigidas apresentam em FigLe e Faro uma ligeira diminuição em valor absoluto. Em Sines o ajuste que resulta dos pontos de mudança identificados cobre um período mais extenso provocando uma alteração considerável na tendência para esta localização ($de\ 2.2\ para\ 5.8\ mm/ano$). Este valor é claramente incoerente com os valores de tendência estimados nas restantes estações ondógrafo. A bóia de Sines encontra-se localizada a 380 km a sul da bóia de Leixões na costa oeste Portuguesa partilhando aproximadamente o mesmo clima de agitação marítima.

4. CLIMA DE AGITAÇÃO MARÍTIMA – ALTURA SIGNIFICATIVA

As condições médias globais e sazonais são caracterizadas através dos dados recolhidos com periodicidade de 3 em 3 horas, para os dados de FigLe (1981 a 2020), Sines (1980 a 2020) e Faro (1986 a 2020). Os valores mais frequentes da altura significativa (H_{m0}) nas boias da costa oeste, estão entre *1.0-1.5 m* (FigLe: 22%, Sines: 30%) e *0.5-1.0 m* em Faro (50%); H_{m0} superior a 3m são cerca de 19% em FigLe, 10% em Sines e 1% em Faro; valores superior a 5m são 1.3% em FigLe e 0.7% em Sines e menos de 0.1% em Faro.

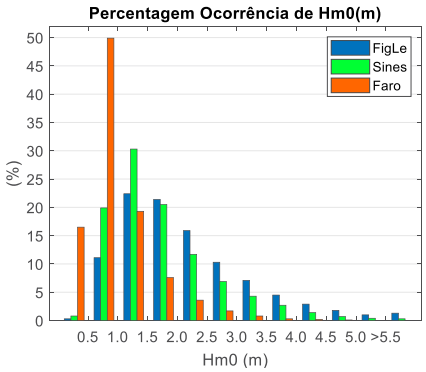


Figura 1 – Percentagem de ocorrência de H_{m0} por classes de altura

Na tabela III, apresenta-se a estatística global e sazonal (verão e inverno), para cada uma das boias. São também referidos os valores máximos globais para a altura significativa ($H_{m0}\ max$) e para a altura máxima ($H_{max}\ max$), considerando todos os dados válidos adquiridos.

Tabela III- Estatística global e sazonal para as três boias (H_{m0})

	H_{m0} Global (m)	H_{m0} Inv. (m)	H_{m0} Ver (m)	H_{m0} *max* (m)	H_{max} *max* (m)
FigLe	2.11	2.55	1.66	10.01	17.62
Sines	1.72	2.10	1.35	11.06	17.27
Faro	0.96	1.16	0.78	6.97	12.02

Na figura 3 apresenta-se a variação ao longo do ano, das médias mensais para cada uma das localizações. As médias mensais de $\overline{H_{m0}}$ em FigLe variam entre 2.9 e 1.4 m, sendo que os meses com médias mais elevadas são os meses de janeiro, fevereiro e dezembro e as mais baixas são julho, agosto e junho. Em Sines, os meses com valores mais elevados são os meses de janeiro (2.3 m), dezembro e fevereiro; os meses com medias mais baixas são agosto (1.2 m) julho e junho. Em Faro, os meses com medias mais altas são dezembro (1.3 m), fevereiro e março; os meses com médias mais baixas são agosto (0.6 m), julho e setembro

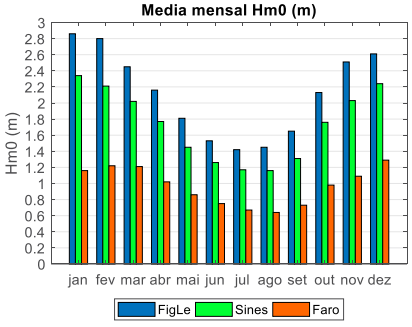


Figura 3 – variação ao longo do ano, das médias mensais de Hm0, para cada uma das localizações.

5. CONCLUSÕES

Ao longo dos últimos 40 anos a rede de bóias operada pelo IH foi sofrendo algumas alterações ao nível do tipo de casco e carga útil, nomeadamente as transições entre a WAVERIDER não direcional para a WAVEC direcional e entre esta e a WAVERIDER direcional. No entanto o sistema de aquisição (que inclui a plataforma de estabilização e acelerómetros) foi sendo mantida com poucas alterações, ao que não é alheio o facto de todas as bóias serem do mesmo fabricante.

Esta análise preliminar mostra que em geral se manteve continuidade, os dados são consistentes e que os desvios detetados de tipo 1, apenas encontrados com recurso a uma série de referência, são pequenos e, com a exceção de Sines, não produzem grande impacto no cálculo de estimadores estatísticos de longo termo.

Tendo em conta as datas dos pontos de mudança, as não homogeneidades encontradas poderão estar relacionadas com a transição entre as bóias não direcionais e as bóias direcionais e/ou com falta de dados. Esse parece ser o caso nos registos de Sines e Faro onde se estimou desvios negativos. O registo de FigLe não possui falhas de dados e ao contrário das restantes estações apresenta um desvio positivo.

O ajuste provocado pelos desvios encontrados no registo de Sines dá origem a uma alteração na tendência linear de 2.2 mm/ano para 5.8 mm/ano. O valor obtido com a correção é inconsistente com os valores corrigidos das restantes estações. O esquema de ajuste, assumindo que os dados mais recentes são os mais precisos poderá não ser o mais adequado neste caso. Em FigLe e Faro a correção dos desvios diminui em valores absolutos a tendência linear de longo termo. Em Leixões passa de 2.9 mm/ano para 1.2 mm/ano e em Faro de $-1.3\ mm/ano$ para $-0.7\ mm/ano$. Independentemente de se considerar a correção, os resultados mostram uma tendência positiva na costa oeste de Portugal continental e uma tendência negativa na costa do Algarve. Este padrão é confirmado nos resultados obtidos para o percentil 90 da altura significativa não corrigida.

Para trabalho futuro a homogeneidade dos registos será testada para pontos do tipo 0 e utilizado outras metodologias de ajuste, como a correspondência por quantil, que ao contrário do esquema de ajuste usado nesta abordagem, corrige os períodos de inverno e verão de forma diversa.

REFERÊNCIAS

Bacon, S., and D. J. T. Carter (1991). Wave climate changes in the North Atlantic and the North Sea, Int. J. Climatol., 11, 545-558.

Bouws, E., D. Jannick, and G. J. Komen (1996). On increasing wave height in the North Atlantic Ocean, Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 2275-2277.

Dodet, G., X. Bertin, and R. Taborda (2010). Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades, Ocean Modelling 31, 120 – 131.

Dupuis, H., D. Michel, and A. Sottolichio (2006). Wave climate evolution in the Bay of Biscay over two decades, Journal of Marine Systems 63, 105 – 114.

Gulev, S. K., and V. Grigorieva (2004). Last century changes in ocean wind wave height from global visual wave data, Geophysical Research Letters, 31, L24302, doi:10.1029/2004GL021040.

Gunther, H., W. Rosenthal, M. Stawarz, J. C. Carretero, M. Gomez, I. Lozano, O. Serano, and M. Reistad (1998). The wave climate of the Northesat Atlantic over the period 1955 – 1994: The WASA wave hindcast. Global Atmos. Ocean Sys. 6 (2)

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, *et al*. The ERA5 global reanalysis. QJR *Meteorol Soc.* 2020; 146:1999–2049.https://doi.org/10.1002/qj.3803

Izaguirre, C., F. J. Méndez, M. Menèndez, and I. J. Losada (2011). Global extreme wave height variability based on satellite data, Geophysical Research Letters, 38, L10607, doi:10.1029/2011GL047302.

Neu, H. J. A., (1984). Interannual variations and long.term changes in sea state of the North Atlantic from 1970 to 1982, J. Geophys. Res. 89 (C4), 6397-6402.

Thomas, B. R., and V. Swail (2009), Long term wave measurements and trend at Canadian coastal locations, in Proceedings of the Eleventh International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting and Second Coastal Hazard Symposium, Halifax, Canada, 18–23 October 2009, Rep.

Walden, H., N. Hogben, M. D. Burkhart, R. Dorrestein, W. H. Warnsink, and Y. Yamanouchi (1970). Long Term Variability. In: 4th International Ship Structures Congress, Tokyo, Report of Committee 1, pp 49-59.

Wang, X. L. and Y. Feng, published online July 2013: *RHtestsV4 User Manual*. http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml

Wang, X. L., and V. R. Swail (2001). Changes of extreme wave heights in northern hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes, J. Clim. 14, 2204 – 2221.

WASA group (1998). Changing waves and storm in the Northeast Atlantic? Bull. Amer. Meteor. Soc., 79, 741 – 760.

Melhoria do desempenho de modelos hidrodinâmicos estuarinos para previsão de níveis da água utilizando técnicas de *ensembles*

I. Iglesias (1), J. L. Pinho (2), W. Melo (2), P. Avilez-Valente (1,3), A. Bio (1), M. Cruz (4), J. Vieira (2), L. Bastos (1,5), F. Veloso-Gomes (1,3)

(1) Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR/CIMAR), Universidade do Porto, Portugal. iiglesias@ciimar.up.pt.

(2) Centro de Território, Ambiente e Construção (CTAC), Departmento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga, Portugal.

(3) Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal.

(4) Faculdade de Ciências, Universidade do Minho, Braga, Portugal

(5) Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território (DGAOT), Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Portugal.

Resumo: Os modelos numéricos são ferramentas essenciais para caracterizar os padrões hidrodinâmicos complexos de sistemas estuarinos. No entanto, os seus resultados apresentam incertezas que resultam das aproximações das formulações, dos métodos numéricos, dos valores adotados para as ações forçadoras, dos dados da geometria do domínio e de parâmetros de calibração. A técnica de *ensembles* permite diminuir essa incerteza, melhorando as previsões da hidrodinâmica estuarina. Esta técnica foi aplicada em dois estuários portugueses, Douro e Minho, considerando diferentes cenários (verão, inverno, evento extremo). Verificou-se que as técnicas de ensembles que consideram médias ponderadas, com pesos decorrentes do desempenho individual de cada um dos modelos, permitem obter resultados mais aproximados aos valores observados. Verifica-se ainda que os resultados melhoram com o aumento do número de membros do ensemble. Esta técnica será utilizada para simular eventos extremos em climas futuros, e verificar se existe uma resposta diferenciada no comportamento da hidrodinâmica dos estuários estudados.

Palavras-chave: estuários, *ensembles*, eventos extremos, hidrodinâmica, modelos numéricos.

1. INTRODUÇÃO

Os estuários são sistemas dinâmicos, sujeitos à influência de fenómenos meteorológicos, oceanográficos e geomorfológicos, com fortes variações de salinidade, correntes, temperatura e qualidade da água. Possuindo ecossistemas altamente produtivos e sendo geralmente as respetivas margens densamente povoadas e altamente urbanizados, os estuários revestem-se de uma importância ambiental, económica e social estratégica. Mas essas caraterísticas aumentam a sua vulnerabilidade aos efeitos de eventos extremos, alterações climáticas e intervenções antrópicas.

Há uma necessidade urgente de informações científicas precisas para apoiar uma gestão costeira sustentável, reduzir a exposição e vulnerabilidade, mitigar os riscos e promover a adaptação e resiliência das comunidades costeiras. Os modelos numéricos são uma ferramenta fundamental, pois permitem uma compreensão detalhada dos processos que ocorrem nestas áreas. No entanto, cada modelo apresenta vantagens e desvantagens intrínsecas e os seus resultados, incertezas e eventuais erros dependem de muitos fatores distintos. É necessário encontrar e implementar novas soluções que permitam obter resultados mais precisos, sendo uma das técnicas adequada à melhoria das previsões numéricas a técnica de *ensembles*.

Um *ensemble* combina várias simulações de modelos numéricos usando métodos estatísticos. Os resultados obtidos são sintetizados num único resultado que apresenta menores viés e variância relativamente a soluções individuais, melhorando assim a precisão, fiabilidade e consistência da previsão final (Iglesias et al. 2022). É uma técnica comum na simulação de processos atmosféricos e climáticos, aplicada para melhorar as previsões meteorológicas, sazonais, interanuais e de alterações climáticas (WMO, 2012). Contudo, na modelação da hidrodinâmica estuarina, esta técnica ainda não foi amplamente aplicada, sendo raros os trabalhos realizados nesta área (Mohan Das et al., 2017; Iglesias et al., 2019a; Iglesias et al., 2022).

Podemos distinguir duas classes principais de *ensembles*: i) aqueles que usam os resultados de um único modelo e ii) os que são calculados com resultados oriundos de distintos modelos. Um *superensemble* é um *ensemble* multimodelo que usa várias condições iniciais para cada um dos modelos considerados (Iglesias et al., 2019a, Iglesias et al., 2022).

Neste trabalho apresentam-se resultados da aplicação da técnica de ensembles em dois estuários, utilizando-se *superensembles*.

2. ÁREAS DE ESTUDO

Os estuários modelados foram os dos rios Minho e Douro (Fig. 1), pois apresentam dinâmicas e condições ambientais muito diferentes, para além de diferenças nos caudais, morfologia, batimetria, configuração de margens e nível de urbanização.

O Minho desagua no oceano Atlântico entre A Guarda (Espanha) e Caminha (Portugal). O seu estuário é pouco profundo (Fig. 1), com uma extensão de 40 km. A entrada fluvial é controlada pela barragem de Frieira, localizada 80 km a montante da foz. A sua dinâmica é influenciada pela maré, com efeito direto no transporte de sedimentos. A parte inferior apresenta um alargamento que se traduz numa diminuição da velocidade da corrente, criando condições favoráveis à deposição de sedimentos, e causando restrições à navegação e aparecimento de ilhas e bancos de areia durante a maré baixa. Isso é mais perceptível em marés baixas de marés vivas, quando a ligação entre o estuário e o mar se restringe a dois canais rasos (Iglesias et al., 2019b).

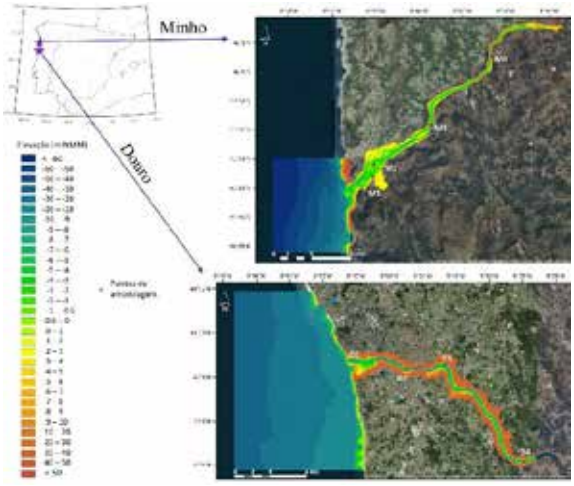


Fig. 1. Localização e topobatimetria dos estuarios do Minho e do Douro.

O Douro desagua no oceano Atlântico através de um estuário urbano, estreito e altamente dinâmico, com regimes torrenciais que produzem fortes correntes e inundações recorrentes. A configuração batimétrica é irregular, com profundidades entre 0 e 10 m e fundões de até 28 m (Fig. 1). A dinâmica estuarina é condicionada pelo caudal e altamente dependente da operação da barragem de Crestuma-Lever, que limita a extensão do estuário a 21 km. Na margem sul, na foz existe uma restinga que obstrui parcialmente a entrada e protege o estuário (Bastos, et al., 2012). Para estabilizá-la, foram realizadas intervenções com um quebra-mar, que interfere nos padrões hidro-morfodinâmicos, causando um aumento persistente e significativo da área e do volume da restinga num período relativamente curto (10 anos). A sua configuração atual reduz a probabilidade de ruptura durante eventos extremos, sendo esperados efeitos mais severos durante as cheias (Bastos et al., 2012, Iglesias et al., 2019a).

3. METODOLOGIA

Os modelos numéricos foram implementados com os programas openTELEMAC-MASCARET (OTM) e Delft3D (D3D) e foram calibrados para os dois estuários considerando condições normais e eventos extremos (Iglesias et al., 2019a, 2019b, 2021; Melo et al., 2020; Melo et al., 2022).

Os modelos simularam condições históricas, permitindo calibrar o *superensemble* com medições *in situ* da elevação da superfície livre em vários pontos (M1 a M4 para o Minho e D1 a D4 para o Douro, Fig. 1). A validação do *superensemble* considerando outros valores de elevação estatísticamente independentes destes não se conseguiu realizar devido à falta de dados. Consideraram-se três cenários com diferentes caudais: verão, inverno e evento extremo, ocorridos durante o ano de 2006 (Tab. i). As simulações realizadas consideraram um período de 24 h com condições de elevação e caudal constantes, precedidos por um período de *spin-up*, onde os modelos são forçados nas fronteiras com valores crescentes de caudais para evitar instabilidades numéricas.

		Data	Caudal (m^3/s)	Desvio padrão (m^3/s)
Minho	Verão	25/08/2006	42	61
	Inverno	23/02/2006	495	528
	Evento extremo	08/12/2006	2476	-
Douro	Verão	17/08/2006	49	201
	Inverno	19/12/2006	1205	979
	Evento extremo	25/11/2006	7795	-

Tab. i. Caudal considerado para cada simulação e desvio padrão do mês simulado.

Efetuaram-se simulações que combinaram diferentes valores de caudal e elevação, sendo o caudal incluído como: (a) valor registado, (b) valor registado acrescido do valor do desvio padrão do mês simulado e (c) valor registado diminuído do valor do desvio padrão do mês simulado (Tab. i). Os desvios padrão foram calculados utilizando os caudais médios diários medidos em Foz do Mouro (1973–2020), para o estuário do Minho, e os caudais médios horários em Crestuma Lever (1998–2020), para o estuário do Douro. Introduziram-se vários valores de elevação no limite oceânico considerando as características da maré durante o ano,

nomeadamente: (a) níveis máximos e (b) mínimos de maré registados no dia da simulação, bem como (c) a maré anual mais alta, (d) a maré viva mais alta, (e) a maré morta mais alta, (f) a maré anual mais baixa, (g) a maré viva mais baixa e (h) a maré morta mais baixa (Tab. ii). Para o evento extremo foi incluída uma elevação adicional de 1,10 m que poderá ser, entre outros, associada à sobreelevação meteorológica.

Níveis considerados	**Minho**	**Douro**
	Elevação (m)	Elevação (m)
Máximo verão	1,39	0,78
Mínimo verão	-1,30	-0,76
Máximo inverno	0,79	1,06
Mínimo inverno	-0,64	-1,05
Máximo evento extremo	1,32	1,20
Mínimo evento extremo	-1,18	-1,07
Maré anual mais alta	1,84	1,86
Maré viva mais alta	1,47	1,48
Maré morta mais alta	0,66	0,66
Maré anual mais baixa	-1,8	-1,79
Maré viva mais baixa	-1,47	-1,48
Maré morta mais baixa	-0,67	-0,65

Tab. ii. Níveis de elevação considerados na fronteira oceânica.

Os *ensembles* são construídos usando técnicas estatísticas que reúnem os diferentes resultados numa única previsão. Existem muitos métodos estatísticos para o fazer, sendo necessário selecionar aquele que melhor se adapta a cada problema. A técnica mais simples é a de usar a mediana ou a média aritmética dos valores resultantes dos modelos individuais. No entanto, diferentes modelos numéricos possuem diferentes capacidades, e considerar a capacidade preditiva de cada modelo individual pode melhorar a previsão. Isso pode ser realizado através do cálculo de médias ponderadas, atribuindo um peso a cada modelo de acordo com o respetivo desempenho individual. Este peso é calculado comparando os resultados dos modelos individuais com observações *in situ*. Neste caso, o erro absoluto (MP-EA) e o erro quadrático (MP-EQ) foram adotados como coeficientes de ponderação.

Para avaliar os resultados do *ensemble*, estes foram comparados com os valores observados, utilizando-se o erro absoluto (AE) como métrica de desempenho.

4. RESULTADOS

As simulações realizadas mostram que existem variações entre os erros do OTM e os do D3D considerando os distintos cenários, estuários e pontos (Tab. iii). A média do erro mínimo do OTM é de 0,299 m, enquanto que a do D3D é de 0,383 m. Esta diferença não permanece constante para todos os cenários considerados. Nos cenários de inverno e eventos extremos, o OTM superou o D3D com erros médios mínimos de 0,093 m e 0,145 m para inverno e 0,444 m e 0,649 m para eventos extremos. No entanto, para o cenário de verão, os erros dos dois modelos são semelhantes, com erro médio mínimo de 0,388 m e 0,389 m para OTM e D3D, respetivamente. Se analisarmos os estuários representados, o estuário do Minho apresentou soluções mais precisas, com um erro médio global mínimo de 0,153 m e de 0,191 m, para OTM e D3D, respetivamente. Os erros mínimos médios globais para o Douro foram 0,420 m (OTM) e 0,543 m (D3D).

Estuário	**Cenário**	**Ponto**	**EA mínimo (m)**		**Técnica *ensemb.***	**EA *ensemb.* (m)**
			D3D	**OTM**		
Minho	Verão	M1	0,492	0,469	MP-EA	0
		M3	0,291	0,302	MP-EA	0
		M4	0,303	0,303	MP-EA	0
	Inverno	M1	0,001	0,004	MP-EC	0,001
		M2	0,074	0,015	MP-EC	0,009
		M3	0,082	0,253	MP-EC	0,009
		M4	0,116	0,053	MP-EC	0,004
	Evento extremo	M1	0,162	0,081	Media	0,037
		M3	0,053	0,016	MP-EC	0,002
		M4	0,334	0,035	MP-EC	0,028
Douro	Verão	D1	0,376	0,375	MP-EA	0
		D2	0,431	0,438	MP-EA	0
		D3	0,430	0,429	MP-EA	0
		D4	0,402	0,397	Media	0,024
	Inverno	D1	0,505	0,286	MP-EA	0
		D2	0,123	0,065	MP-EA	0
		D3	0,249	0,028	MP-EC	0,013
		D4	0,011	0,040	MP-EC	0,008
	Evento extremo	D1	0,096	0,609	MP-EC	0,012
		D2	1,679	0,592	MP-EC	1,390
		D3	2,036	1,737	MP-EC	2,506
		D4	0,182	0,041	MP-EC	0

Tab. iii. Erros absolutos (EA) mínimos para cada modelo, cenário e ponto de amostragem, identificação da melhor técnica de construção do superensemble e EA do superensemble.

Os maiores erros mínimos foram obtidos para o cenário de eventos extremos no ponto D3 (Tab. iii). Os eventos extremos podem ser difíceis de modelar devido à complexidade da sua dinâmica e aos fortes processos erosivos e inundações, que apresentam um comportamento hidrodinâmico diferente no canal principal. Assumiu-se que os dados medidos representam a realidade. No entanto, não se pode descartar que essas grandes diferenças entre os níveis de água medidos e simulados possam estar relacionadas com erros nas campanhas de amostragem ou com imprecisões nos modelos numéricos para esses locais específicos.

Entre as técnicas de construção do *superensemble* que fornecem os melhores resultados para cada

cenário, estuário e ponto de amostragem, destaca-se a técnica que considera médias ponderadas. O MP-EQ revelou-se como a melhor técnica para cenários com elevado caudal (inverno e eventos extremos), enquanto o MP-EA teve melhor desempenho em situações de baixo caudal (verão). Para quase todas as simulações, o *superensemble* obteve erros absolutos inferiores aos obtidos pelos modelos individualmente, demonstrando que os *superensembles* são capazes de melhorar a previsão obtida com modelos hidrodinâmicos aplicados em estuários.

Os resultados dos cenários de verão e inverno foram divididos em dois grupos: um grupo para as 24 simulações que consideraram as condições oceânicas com o nível de água mais elevado e outro para as outras 24 que consideraram o nível mais baixo. Os resultados para cada grupo foram comparados com os níveis de água mais elevados e mais baixos registados nas medições. Para o *superensemble* construído com as 24 simulações de níveis elevados, os erros nos resultados obtidos foram geralmente inferiores a 0,1 m. No entanto, em 5 dos 15 cenários/pontos de amostragem, o *superensemble* não melhorou as previsões dos modelos individuais. Para o *superensemble* construído com os 24 membros para as previsões de níveis mais baixos, a situação é muito parecida, superando o resultado dos modelos individualmente em 7 de 15 simulações. Este resultado é demonstrativo de que o número de membros do *ensemble* é crucial para a melhoria da previsão.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho demostrou que a técnica de *ensembles* permite melhorar a previsão de modelos hidrodinâmicos em estuários. Verificou-se para dois estuários distintos (Minho e Douro), em três cenários (verão, inverno e evento extremo) e em distintos pontos de cada estuário. Assim, a técnica de *ensembles* permite diminuir as incertezas associadas a previsões realizadas com base em modelos numéricos, produzindo melhores resultados do que cada um dos modelos individualmente, obtendo-se resultados mais próximos dos valores observados. As técnicas estatísticas de construção de *ensembles* que se mostraram mais eficazes foram baseadas em médias ponderadas. Não foram encontradas diferenças relevantes entre os dois estuários, nem associadas à localização dos pontos de amostragem, mostrando que esta técnica pode ser amplamente aplicada a qualquer estuário. Foi ainda verificado que o número de membros do *ensemble* afetou a qualidade da previsão, obtendo-se soluções mais precisas com o *superensemble* que considerou mais membros. A aplicação de diferentes modelos reduz a incerteza nos resultados e aumenta a confiança e consistência das previsões.

Agradecimentos

Esta investigação foi financiada pelo Fundo Estratégico UIDB/04423/2020 e UIDP/04423/2020 através de fundos nacionais da FCT e do FEDER. Foi ainda financiado pelo projeto EsCo-Ensembles (PTDC/ECIEGC/30877/2017), FCT, NORTE 2020, Portugal 2020 e UE (FEDER).

REFERÊNCIAS

Bastos, L., Bio, A., Pinho, J.L. et al. (2012). Dynamics of the Douro estuary sand spit before and after breakwater construction. *Estuarine, Coastal and Shelf* Science, 109, 53–69. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.05.017

Iglesias, I, Venâncio, S., Pinho, J.L., et al. (2019a). Two Models Solutions for the Douro Estuary: Flood Risk Assessment and Breakwater Effects. *Estuaries and Coasts*, 42(2), 348–364. doi: 10.1007/s12237-018-0477-5

Iglesias, I, Avilez-Valente, P., Bio, A., et al. (2019b). Modelling the Main Hydrodynamic Patterns in Shallow Water Estuaries: The Minho Case Study. *Water*, 11(5), 1040. doi: 10.3390/w11051040

Iglesias, I, Bio, A., Bastos, L., et al. (2021). Estuarine hydrodynamic patterns and hydrokinetic energy production: The Douro estuary case study. *Energy*, 222, 119972. doi: 10.1016/j.energy.2021.119972

Iglesias, I., Pinho, J.L., Avilez-Valente, P., et al. (2022). Improving Estuarine Hydrodynamic Forecasts Through Numerical Model Ensembles. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1–18. doi: 10.3389/fmars.2022.812255

Melo, W., Pinho, J., Iglesias, I., et al. (2020). Hydro- and Morphodynamic Impacts of Sea Level Rise: The Minho Estuary Case Study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(6), 441. doi: 10.3390/jmse8060441

Melo, W., Pinho, J.L., Iglesias, I., et al. (2022). Flood Risk Assessment at the Douro River Estuary. In S. Kolathayar, A. Mondal, & S. C. Chian (Eds.), Lecture Notes in Civil Engineering (Climate Ch, pp. 37–49). Springer. doi: 10.1007/978-981-16-5501-2_4

Mohan Das, D., Singh, R., Kumar, A., et al. (2017). A Multi-Model Ensemble Approach for Stream Flow Simulation. In Modeling Methods and Practices in Soil and Water Engineering (pp. 71–102). Oakville, ON; Waretown, NJ : Apple Academic Press. doi: 10.1201/b19987-5

WMO. (2012). Guidelines on Ensemble Prediction Systems and Forecasting. World Meteorological Organization, Geneva. http://www.wmo.int/pages/prog/www/Documents/1091_en.pdf

La red de mareógrafos del Instituto Geográfico Nacional. Inicios, estado y evolución

V. Martín Guijarro (1), V. Puente García (2)

(1) Instituto Geográfico Nacional (IGN). vmarting@mitma.es

(2) Instituto Geográfico Nacional (IGN). vpuente@mitma.es

Resumen: a rede de marégrafos do Instituto Geográfico Nacional (IGN) é composta por um conjunto de sensores que registam as alterações e variações do nível do mar ao longo do tempo. As suas origens remontam ao século XIX, quando foi estabelecido o primeiro dado altimétrico. Desde então a rede vem aumentando e aprimorando seus instrumentos até os dias atuais. Atualmente o IGN conta com dez marégrafos distribuídos entre a Espanha continental, a Ilha de Alborán e as Ilhas Canárias. Para além da manutenção dos instrumentos, gestão da rede e ligação à Rede de Nivelamento de Alta Precisão (REDNAP), o IGN está a proceder à análise das séries históricas dos marégrafos e à comparação das variações do nível do mar com GNSS observações, dentre as quais se destaca uma nova técnica, ainda em fase de estudo, que é a reflectometria GNSS.

Palabras clave: altimetría, geodesia, GNSS, GNSS-R, mareógrafo, nivel del mar, sistema de referencia, reflectometría GNSS.

1. INTRODUCCIÓN

Los océanos, sus aguas y sus fondos siguen siendo tan interesantes como desconocidos a ojos de la ciencia. Son muchas las especialidades que han enfocado su campo de estudio sobre los interrogantes que lo envuelven. La geodesia, entre otras aplicaciones, ha tratado de dar respuesta a la compleja tarea de establecer una superficie de referencia, con la cual desarrollar un sistema de referencia de altitudes. El Instituto Geográfico Nacional, lleva desde sus inicios estableciendo un datum de altitudes para España, que serviría de base para la posterior red de nivelación y del Mapa Topográfico Nacional. Pero esta tarea no ha sido sencilla, debido tanto a las limitaciones iniciales del instrumental, como de las dificultades debidas a las dinámicas oceánicas, la variabilidad y cambios del nivel del mar. Este documento pretende, a modo de artículo sobre el estado del arte, exponer los trabajos llevados a cabo por el Instituto Geográfico Nacional con relación a los mareógrafos y el nivel medio del mar. Los inicios de la red de mareógrafos, su evolución a lo largo del tiempo, las actividades que se llevan a cabo y hacia dónde nos lleva la ciencia y la técnica en el futuro más próximo.

2. INICIOS DE LA RED

El Instituto Geográfico Nacional, como institución competente en geodesia en España, lleva desarrollando desde hace más de cien años la labor de registro y estudio del nivel del mar (NMM). El origen de esta red se remonta al siglo XIX, cuando, con el propósito de determinar un datum altimétrico para la España Peninsular, el cual serviría de origen de altitudes del Mapa Topográfico Nacional, estableció en Alicante el primer registro del nivel medio del mar.

La elección de Alicante no fue casual. Tras estudiar las limitaciones que las metodologías e instrumental de la época ofrecían, se buscó el emplazamiento en la costa española en la que las variaciones entre bajamar y pleamar fueran las menores posibles. El datum altimétrico de Alicante se estableció inicialmente en base a mediciones sucesivas en una regla de mareas entre los años 1870 y 1872. Estas medidas fueron referidas al clavo NP1, ubicado en el Ayuntamiento de Alicante. Desde allí, las altitudes se fueron trasladando al resto de España mediante líneas y ramales de nivelación que conformarían la primera Red de Nivelación de Alta Precisión (REDNAP).

En 1874 se instaló el primer mareógrafo de registro continuo que funcionó en España, localizado en el puerto de Alicante. Posteriormente y de forma paralela a los trabajos de nivelación, se densificó la red construyendo nuevos mareógrafos en Santander (1876), Cádiz (1880) y Santa Cruz de Tenerife (1926); los dos primeros ya extintos, aunque se conservan todavía los edificios y los registros de datos. Con el devenir de los años y las sucesivas ampliaciones de las infraestructuras portuarias, en muchos casos los mareógrafos han cambiado de emplazamiento, construyéndose otros nuevos y enlazando mediante nivelación las señales de referencia de las estaciones antiguas y nuevas para conseguir la continuidad de la serie de datos. A mediados del siglo pasado se construye el mareógrafo de La Coruña (1948) y un segundo mareógrafo en Alicante (1953). Seguidamente se van estableciendo nuevas ubicaciones: Almería, Cartagena, Pasajes, Puerto del Rosario (Fuerteventura) y más

recientemente, en Puerto de la Cruz y Los Cristianos, estos últimos en la isla de Tenerife.

En la actualidad, la red de mareógrafos del IGN consta de diez estaciones operativas a lo largo de toda la costa de la España Peninsular, las Islas Canarias y la Isla de Alborán: Alicante 1, Alicante 2, Cartagena, Almería, La Coruña, Alborán (Isla de Alborán), Santa Cruz de Tenerife (Isla de Tenerife), Puerto de la Cruz (Isla de Tenerife), Los Cristianos (Isla de Tenerife), Puerto del Rosario (Isla de Fuerteventura).

3. TIPOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN

Los mareógrafos más antiguos con los que cuenta el IGN tienen una disposición y estructura tradicional. Consisten básicamente en un edificio en el cual hay un pozo conectado al mar. Los ascensos y descensos del nivel medio del mar se corresponderán con los de la lámina de agua del pozo, con la ventaja de que el pozo reduce considerablemente influencias locales de la orilla del mar, como tráfico portuario, tormentas, etc.

- Registro gráfico: los movimientos del flotador se registran de forma continua sobre una banda de papel. Es la forma en la que se registraron las series históricas. Se dejaron de utilizar a finales del siglo XX.
- Registro digital mediante codificador angular: el movimiento se transmite por una boya que flota en el agua y que está unida a un cable que mueve una rueda. Posteriormente este movimiento se traduce en una señal digital.
- Sensor radar: permite la medición de las variaciones del nivel del mar de la lámina de agua mediante ondas de radar. Tiene la ventaja de que no es necesario el contacto entre el propio sistema de medición y el agua.

Mareógrafos	Codificador angular	Radar	Barómetro
La Coruña 1	1	1	-
Alicante 1	1	1	-
Alicante 2	1	1	1
Alborán	-	1	-
Almería 2	1	1	-
Fuerteventura 2	-	2	-
Cartagena 2	1	1	-
S.C.Tenerife 3	-	2	-
P. Cruz	-	1	-
Los Cristianos	-	1	-

Tab. i. Instrumentación de los mareógrafos del IGN

En la mayoría de los casos se combinan varias técnicas o sensores con el objeto de comparar los datos, corroborar y calibrar. En la Tabla i se muestra la instrumentación de que disponen actualmente los mareógrafos del IGN.

4. ANÁLISIS DE SERIES HISTÓRICAS

La importancia de un mareógrafo aumenta con los años y los datos que va registrando. Así pues el IGN cuenta con abundante documentación histórica de mareógrafos como Alicante, Santander o Santa Cruz de Tenerife. Para el estudio de estas series se requiere un proceso de digitalización, ya que hasta finales del siglo XX la mayoría de los mareógrafos registraban únicamente en papel. De igual modo el proceso de análisis de los datos registrados por los mareógrafos ha ido evolucionando a lo largo del tiempo, al igual que la instrumentación, captura de la información y almacenamiento de la misma.

En un principio, los valores de marea se obtenían midiendo directamente sobre el registro gráfico longitudes o superficies con los que obtener los valores y promedios. Posteriormente se procedió a la digitalización de la curva en mesa digitalizadora, obteniendo de una imagen vectorial los valores de la curva. Actualmente, cuando se trata de recuperar datos históricos registrados en banda, se escanea la imagen y se digitaliza la misma para obtener los valores.

Hoy en día, todos los mareógrafos poseen registradores digitales, por lo que este proceso no es necesario ya que se transmiten en tiempo real a la base de datos donde se almacenan.

El estudio de las series históricas revela el ascenso del nivel medio del mar, debido fundamentalmente al cambio climático y al deshielo de los casquetes polares. Permite también realizar análisis de las dinámicas oceánicas, y las diferencias entre el Mar Mediterráneo y el Océano Atlántico, así como sus diferencias altimétricas. El análisis de series históricas ha permitido la publicación de varios artículos, como Cádiz [1] Marcos M et al. (2011), Tenerife [2] Marcos M et al. (2013) o Alicante y Santander Cádiz [1] Marcos M et al. (2020).

5. NIVEL DEL MAR Y NIVELACIÓN

Al ubicar un mareógrafo, se persigue la máxima estabilidad y la mínima alteración a lo largo del tiempo. No obstante, pueden suceder multitud de factores que modifiquen y afecten de alguna manera al mareógrafo y el registro óptimo de sus datos. Factores como obras en las instalaciones portuarias, accidentes con barcos, subsidencias y asientos de la dársena o dique donde se sitúa el pozo, acumulación de arena en el fondo del mismo o el deterioro del mareógrafo debido a temporales, entre otras causas, afectan negativamente al registro de datos y a la propia permanencia del mareógrafo.

Para tener un control altimétrico cada estación tiene un clavo de nivelación situado en el brocal del pozo o lo más próximo al punto de medida, denominado *Bench Mark* (BM). Es en esta señal sobre la que se refiere el nivel del mar. Para controlar los posibles movimientos verticales que pueda experimentar el mareógrafo, esta señal se enlaza con otra situada en una zona que se considera estable y a la que irán referidos los cálculos finales de niveles medios, la *Join Mark* (JM). Resulta pues fundamental ejecutar periódicamente un control altimétrico de cada mareógrafo. El método empleado es la nivelación geométrica. Se nivela desde la *Bench Mark* y otras señales en los alrededores del mareógrafo hasta otras señales, más estables, fuera de la influencia del puerto, el mareógrafo y los factores negativos que puedan alterarlos (*Join Mark*). Lo idóneo es tener un control altimétrico de todos estos cambios, para poder conocer su valor, causa y así poder corregir su efecto en las series de datos.

Además, resulta imprescindible enlazar todos los mareógrafos a REDNAP, mediante ramales de nivelación, ya que a partir de uno o varios mareógrafos es como se establece el datum altimétrico. Lógicamente, tanto el propio enlace como los trabajos de control altimétrico se hacen siguiendo el pliego de prescripciones técnicas de REDNAP, para el aseguramiento de unas homogéneas metodologías de trabajo, precisiones y resultados en las nivelaciones.

6. APLICACIÓN DEL SISTEMA DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE (GNSS)

El Sistema de Navegación por Satélite (GNSS) es una técnica de geodesia espacial que permite conocer la posición de puntos sobre la superficie terrestre por medio de la observación a satélites. El IGN mantiene y gestiona estaciones permanentes GNSS en varios de sus mareógrafos, incluso en mareógrafos de otras instituciones como Puertos del Estado (PdE). Este proceder responde a una necesidad mutua de ambas técnicas: en los mareógrafos, el uso del GNSS permite disponer de un nuevo sensor para detectar posibles cambios en la posición del emplazamiento, debidos a alteraciones, subsidencias u otros fenómenos como los mencionados en el apartado anterior. Para la Red Española GNSS (ERGNSS), supone la densificación de la red con la instalación de nuevas estaciones permanentes GNSS en zonas de costa, en emplazamientos que ya previamente contaban con alimentación eléctrica y comunicación a Internet. En la Tabla ii se recogen los mareógrafos en España equipados con una estación GNSS.

Mareógrafos	Titularidad Mareógrafo	Estación Permanente	Titularidad GNSS
A Coruña 1	IGN	ACOR	IGN
Langosteira	PdE	LNGS	IGN-PdE
Gijón 2	PdE	XIX1	IGN-PdE
Barcelona 2	PdE	BCL1	IGN-PdE
Tarragona	PdE	TRRG	IGN-PdE
Alicante 2	IGN	ALAC	IGN
Cartagena 2	IGN	CARG	IGN
Almería	IGN	ALM1	IGN
Tarifa	IEO	TAR0	IGN
Huelva 5	PdE	HUE1	IGN-PdE
Melilla	PdE	MLLL	IGN-PdE
Palma de Mallorca	PdE	MAL1	IGN-PdE
Sta. Cruz de Tenerife	IGN	TN01	IGN
Sta. Cruz de Tenerife 2	PdE	TN01	IGN
La Gomera	PdE	GOM1	IGN-PdE

Tab. ii. Mareógrafos en España equipados con una estación permanente GNSS

En el resto de mareógrafos, tanto del IGN como de Puertos del Estado (PE) o el Instituto Español de Oceanografía (IEO), suelen estar enlazados a alguna estación permanente GNSS que, no estando en el propio emplazamiento del mareógrafo, está en las inmediaciones y se ha nivelado.

7. REFLECTOMETRÍA GNSS

La reflectometría GNSS (GNSS-R) es una técnica que permite detectar y medir los cambios y variaciones que se puedan producir en el entorno circundante a una estación permanente mediante el análisis exclusivamente de señales reflejadas. Estas señales llegan a la antena GNSS rebotadas de alguna superficie como el suelo, la cubierta vegetal, nieve o una lámina de agua.

La metodología consiste en seleccionar valores de elevación y acimut entorno a la estación que sean de interés, de forma que se pueda asegurar que los datos registrados procedan exclusivamente de señales reflejadas por la superficie del agua en este caso.

A continuación se analizan los observables de señal-ruido (*signal to noise ratio* o SNR) cuya variación está asociada a los cambios en la altura de la superficie reflectante.

Se ha llevado a cabo una prueba piloto con las estaciones GNSS que están en los mareógrafos de Barcelona (BCL1), Alicante (ALAC) y Palma de Mallorca (MAL1) utilizando la metodología propuesta por *Strandberg*, [4] *Strandberg* et al. (2016). Los resultados se han comparado

posteriormente con las variaciones registradas por los propios sensores radar de cada mareógrafo para el mismo periodo de tiempo, viendo que los resultados son coherentes con un error medio cuadrático de unos 3 cm [5] Puente y Valdés (2019).

El uso de esta nueva técnica permitiría usar los GNSS en un nuevo enfoque, analizando y cuantificando las variaciones debidas a las señales reflejadas, que suelen ser las que tradicionalmente se han venido desechando de todos los cálculos y procesamientos GNSS precisamente por su peor calidad. La reflectometría GNSS puede ser un complemento idóneo en el registro del nivel del mar de un mareógrafo, pues permitiría comprobar y contrastar los datos del radar o del codificador angular, completando posibles huecos en las series de datos en caso de fallar alguno de los otros dispositivos.

8. PUBLICACIÓN DE DATOS

El IGN dispone de un servicio de consulta de los datos de todos sus mareógrafos. Además, comparte los datos con Puertos del Estado para que también se puedan consultar junto a sus mareógrafos en el visor Portus. También se publican los datos en visores y servicios de organizaciones de ámbito internacional, como el Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (SONEL) o Global Sea Level Observing System (GLOSS).

9. SISTEMA DE ALERTA DE TSUNAMIS

Los mareógrafos también se utilizan en otras Áreas del IGN, por ejemplo intervienen en el Sistema de Alerta de Tsunamis. Este sistema, pionero en España, se encarga de registrar, analizar y alertar de cualquier evento sísmico que tenga su foco en el lecho marino y que pueda producir un tsunami que llegue a nuestras costas. Los mareógrafos, permitirían constatar fehacientemente el momento en el que la ola alcance tierra firme, así como su envergadura y dimensiones.

Para ello, además de los mareógrafos del IGN antes citados, se cuenta con otros específicos para el sistema de alerta de tsunamis, que son los siguientes:

- Mahón (Menorca)
- Ciudadela (Menorca)
- Cartagena
- Ceuta
- Cádiz
- Garachico (Tenerife)
- Tazacorte (La Palma)

Además, las estaciones mareográficas de las islas Canarias, y en concreto las de Puerto de la Cruz y Los Cristianos en la isla de Tenerife se instalaron para recoger información para el Servicio de Vigilancia Volcánica del IGN.

10. CONCLUSIONES

El Instituto Geográfico Nacional cuenta con una nutrida red de mareógrafos desplegados por la práctica totalidad de las costas españolas y todos los océanos que las bañan. La antigüedad de sus registros, da un valor añadido si cabe a esta red, ya que permiten análisis temporales muy completos en sus mareógrafos. La llegada de Internet, las telecomunicaciones y el avance de la instrumentación han permitido una mejor captura, gestión y almacenamiento de los datos, lo que también repercute en los usuarios finales, ya que facilita la publicación y libre distribución de los mismos.

La irrupción del GNSS ha permitido disponer de una nueva técnica para detectar posibles variaciones en los mareógrafos, como subsidencias o deformaciones en el emplazamiento. Además, con la reflectometría GNSS ha quedado probada para el futuro su aplicabilidad para medir el nivel del mar, pudiendo usarse en lugares donde no exista una red de mareógrafos previa y a un menor coste y mantenimiento que los mareógrafos convencionales.

REFERENCIAS

Marcos M et al, 2011. “The long sea level record at Cadiz (southern Spain) from 1880 to 2009”. *J Geophys Res* 116:C12003, doi: 10.1029/2011JC007558

Marcos M et al, 2013. “Sea level changes at Tenerife Island (NE Tropical Atlantic) since 1927”. *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, doi:10.1002/jgrc.20377

M. Marcos et al, 2020. “Historical tide-gauge sea-level observations in Alicante and Santander (Spain) since the 19th century”. EGU 2020

Strandberg J. et al, 2016. “Improving GNSS-R sea level determination through inverse modeling of SNR data”. Radio Sci. 2016, 51, 1286–1296.

Puente V y Valdés M., 2019. Sea level determination in the Spanish coast using GNSS-R. *Proceedings*, 19, 11, doi: 0.3390/PROCEEDINGS2019019011.

UniTIDE – uma ferramenta para dados maregráficos

D. C. P. Silva (1), D. Carinhas (2)

(1) RJ/Brasil, diogoceddia@id.uff.br.

(2) Instituto Hidrográfico. dora.carinhas@hidrografico.pt.

Resumo: O crescente desenvolvimento tecnológico acompanhou uma demanda por visualização, processamento e análise de dados sem precedentes. No âmbito dos dados maregráficos, ferramentas eficientes que atendam essas necessidades são fundamentais. Visto isso, o software uniTIDE propõe uma forma simples, versátil e intuitiva de visualizar, processar e analisar dados maregráficos. A sua construção é suportada em três pilares: (1) utilidade, através da unificação de ferramentas adaptadas à necessidade de qualquer analista; (2) transparência, provendo ao usuário o controle de todas as variáveis envolvidas no processo. Além disso, não possui 'caixas negras': a documentação é detalhada, e há ajudas em todos os menus; e (3) design inteligente, objetivando uma interface intuitiva, que atenda a necessidade dos usuários iniciantes e avançados.

Palavras-chave: análise de dados, maré, processamento de dados, python GUI.

1. INTRODUÇÃO

Com o rápido e crescente desenvolvimento tecnológico e computacional, a capacidade para medir e controlar fenómenos, variados, cresceu substancialmente. Tal contexto institui a "Era dos Dados", marcando uma disrupção do registo e armazenamento de dados físicos para o formato digital. Não somente ao que tange o armazenamento, as informações digitalizadas são passivas de processamento e análise via ferramentas computacionais, possibilitando uma agilidade e praticidade sem precedentes. Além disso, a digitalização permite não só integrações do sistema de armazenamento/análise, mas também a lidar com quantidades de informação muito maiores.

No âmbito do processamento e análise dos dados maregráficos, o *software* uniTIDE propõe uma interface (GUI – *Graphic User Interface*) simples e intuitiva, orientada ao usuário, no formato executável *standalone* e projetado em Python. Aqui, entende-se por usuário qualquer especialista em marés, oceanografia ou hidrografia. O objetivo é abstrair a programação, oferecendo um *software* que unifica ferramentas cotidianas fundamentais. Ele baseia-se em três pilares:

(1) utilidade, pois reúne o máximo de ferramentas possíveis de acordo com as necessidades do usuário;

(2) transparência, através de um controle total pelo usuário das variáveis empregues, sem "caixas negras" e com documentação disponível, detalhada e de fácil acesso;

(3) design inteligente, através de uma interface feita pensando em atender a necessidade do usuário básico até o mais avançado.

O *software* uniTIDE, atualmente, contempla as seguintes ferramentas já em pleno funcionamento:

I. Abrir dados de maré em qualquer formato;
II. Graficar os dados da maré e seus níveis médios;
III. Apresentar as principais estatísticas descritivas dos dados;
IV. Aplicar o filtro butterworth;
V. Calcular da maré residual;
VI. Calcular a Transformada Rápida de Fourier dos resíduos;
VII. Calcular a Transformada Rápida de Fourier da maré;
VIII. Efetuar a reamostragem dos dados;
IX. Exportar em formato ASCII todos os produtos gerados citados acima.

Em desenvolvimento, mas não limitado, ainda estão as seguintes funcionalidades:

X. Abrir e graficar diversas séries de dados de maré, simultaneamente;
XI. Aplicar técnicas de controlo de qualidade;
XII. Efetuar a previsão da maré;
XIII. Analisar e calcular concordâncias de maré entre portos;
XIV. Exportar arquivo de maré adequado à *softwares* de Levantamentos Hidrográficos (ex.: CARIS HIPS and SIPS *.tid);
XV. Criar fluxos de processamento, para que seja possível importar, processar, analisar e exportar diversos dados de maré em simultâneo;
XVI. Arquivar em formato PDF toda a documentação completa das funcionalidades;
XVII. Colocar comandos de ajuda rápida em todos os menus.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O *software* uniTIDE foi desenvolvido em Python, tendo como base, para construção da sua *interface*, a biblioteca nativa tkinter[1].

Para abrir dados de maré (I.), o algoritmo foi estruturado para detectar, automaticamente, qualquer tabulação de texto e colunas referentes aos dados. Se a detecção automática falhar, surgirá uma janela de erro, onde é identificado o erro e dada ao opção, ao utilizador, de inserir, manualmente, os parâmetros.

Os gráficos de maré (II.) possuem opção para o eixo X ser em formato de grupo data-hora ou em dias julianos, e o eixo Y ser em metros, pés ou qualquer outra unidade métrica. Além disso, há a possibilidade de graficar níveis médios do mar em qualquer período desejável.

A descrição estatística do dado de maré carregado (III.) contempla:

- Maior altura de maré registrada no período;
- Menor altura de maré registrada no período;
- Média das alturas registradas em todo período;
- Início do intervalo temporal;
- Fim do intervalo temporal;
- Duração do intervalo temporal;
- Intervalo de amostragem.

A filtragem Butterworth (IV.) consiste num filtro de sinal passa-baixa e é utilizado para eliminar ruídos de alta frequência nas medições de altura da maré (Butterworth, 1930). A frequência de corte e ordem do filtro são parâmetros a serem definidos pelo usuário.

O cálculo da maré residual (V.) é feito através da diferença entre a maré observada e a maré prevista. Essa diferença representa a maré meteorológica.

A Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) dos resíduos (VI.) é uma ferramenta exploratória para identificar algum evento periódico na maré meteorológica. A metodologia matemática foi desenvolvida e publicada por John Turkey (Cooley e Turkey, 1965).

A FFT da maré (VII.) por sua vez compõe a análise harmónica, dedicada para identificar as constantes harmónicas da maré observada (Boon e Kiley, 1978). Pode ser expressa em frequência (Hz) ou em período (horas ou dias).

A reamostragem de marés (VIII.) é feita utilizando, como função interpoladora, a spline cúbica, caracterizada por ser uma curva extremamente suave (triplamente derivável) (Ahlberg e Walsh, 1967). É utilizada para recuperar a totalidade do espectro da curva da maré, para então se prosseguir para a reamostragem.

3. RESULTADOS: O uniTIDE

A interface do *software* uniTIDE foi desenvolvida pensando na utilização tanto em módulos como em fluxo de processamento sucessivo e integrado (ainda em desenvolvimento). Dessa forma, cada ferramenta possui o seu módulo individual, acessado em separadores (Figuras 1 e 3).

Como exemplo, uma simulação do cálculo residual (Figuras 1 e 2) é feita. Aqui, são inseridas a maré observada e prevista, podendo estar em qualquer intervalo de amostragem e temporal. Uma descrição estatística de ambos dados carregados aparece, juntamente com prévia dos dados para o usuário averiguar correto carregamento deles e o diretório do arquivo carregado. Para cara etapa bem-sucedida, o botão adquire cor verde. Com os dados carregados corretamente, é permitido ao usuário computar os residuais, graficá-los definindo unidades métricas (metros, pés, etc.) e temporais (data-hora ou dias julianos), e salvar em formato ASCII. Ao exportar os resíduos, o diretório e nome dos dados salvos aparecem na tela. Com os residuais computados, a opção de calcular a transformada de Fourier dos resíduos é habilitada, permitindo gráfico com eixo X em frequência (Hz) ou período (horas ou dias).

Adicionalmente, uma simulação da aplicação do filtro butterworth foi realizada (Figuras 3 e 4). O menu de importação é idêntico ao descrito na simulação do cálculo dos residuais, assim como todos os botões ficam verdes quando realizam suas tarefas com sucesso. Quando o usuário carrega o dado corretamente, automaticamente os parâmetros do filtro são sugeridos e preenchidos, com a opção de o usuário alterá-los. Uma vez que a filtragem é procedida, o menu de salvar com opção de reamostragem é habilitado. Nesse momento, é possível escolher reamostrar o dado em qualquer intervalo temporal, utilizando o interpolador da spline cúbica.

Em ambas as simulações e todos os produtos gráficos no uniTIDE, há possibilidade de formatação e exportação (Figuras 2 e 4).

[1] https://docs.python.org/3/library/tkinter.html

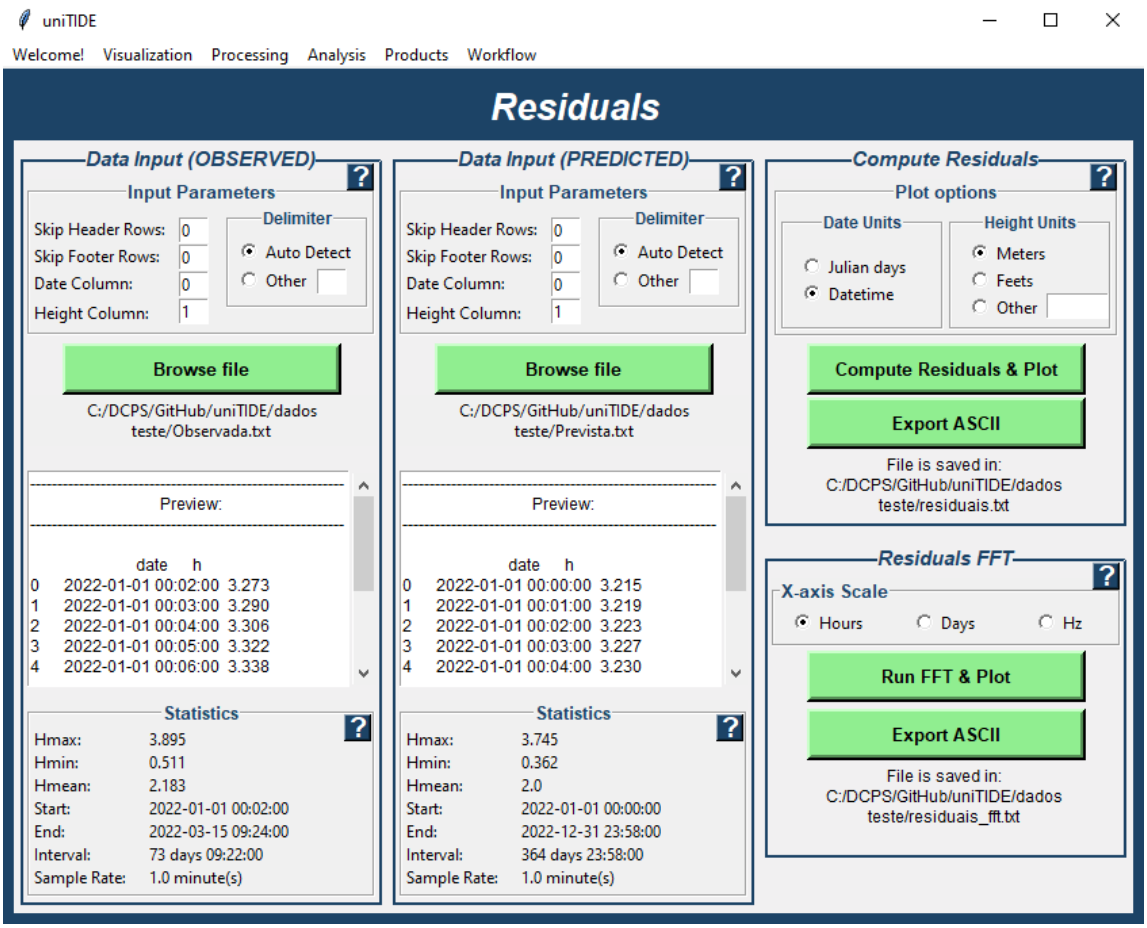


Fig. 1. Exemplo de aplicação prática do cálculo de residuais. No topo, os separadores para acessar todos os menus do uniTIDE.

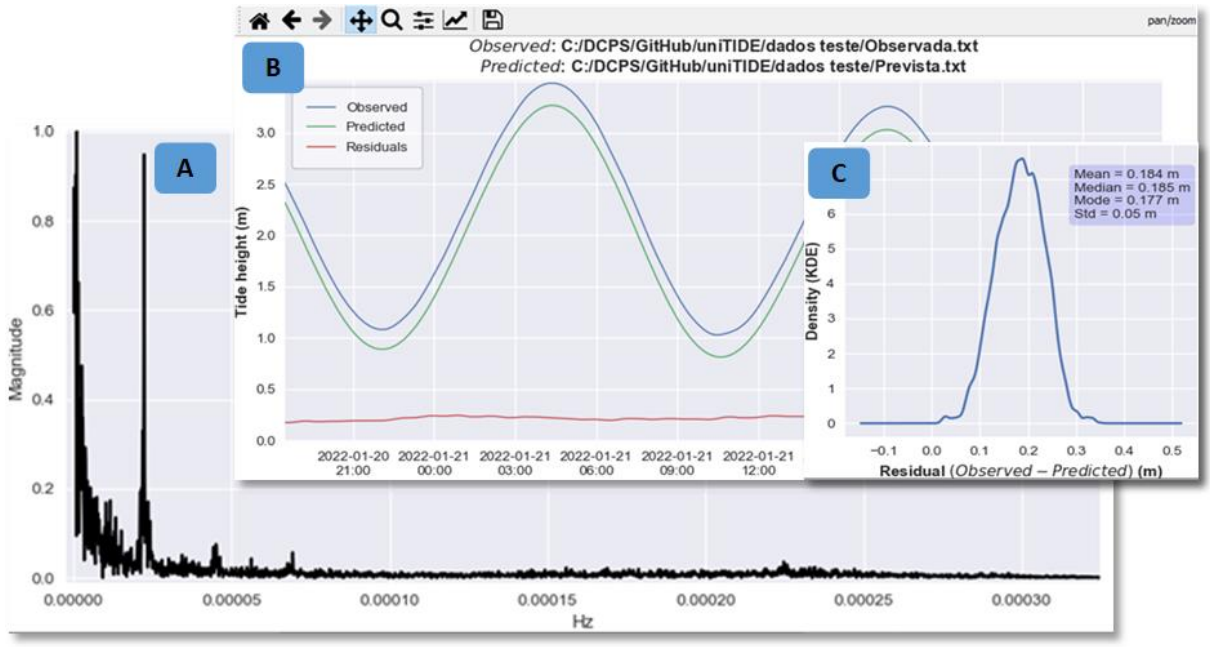


Fig. 2. (A): transformada de Fourier dos resíduos; (B): gráfico da maré prevista, observada e residual; e (C): distribuição de frequências do resíduo, que acompanha descrição estatística. No topo, opções de formatação e exportação dos gráficos. Nos gráficos de FFT e distribuição de frequências, a opção de formatação e exportação foi suprimida com finalidade de visualização.

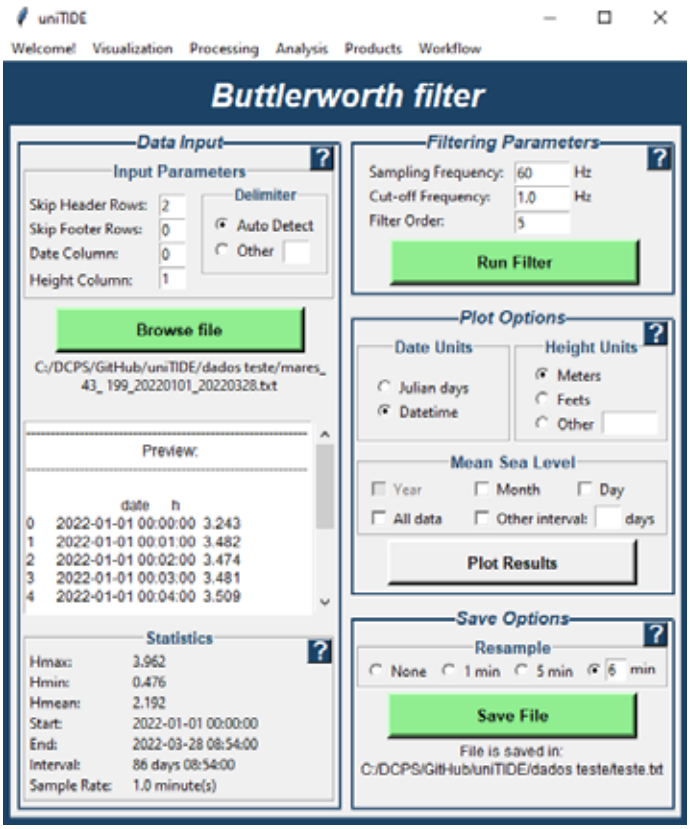


Fig. 3. Exemplo de aplicação de filtragem butterworth nos dados de maré. No topo, os separadores para acessar todos os menus do uniTIDE.

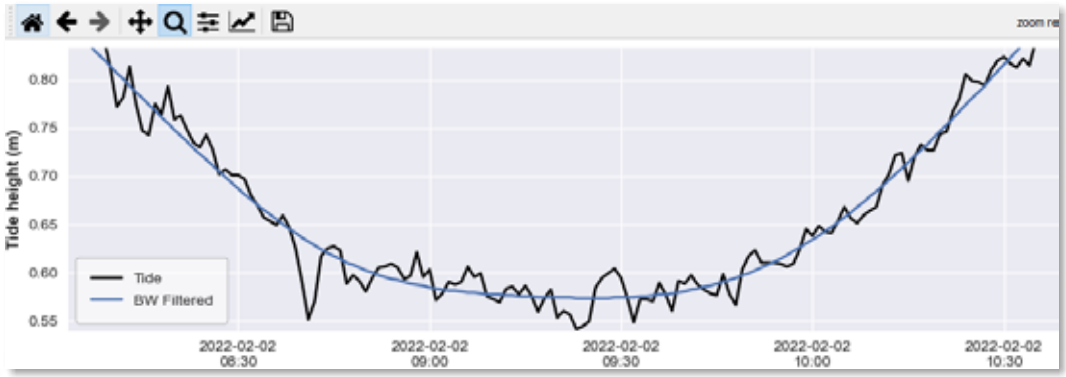


Fig. 4. Gráfico em aproximado, evidenciando a filtragem butterworth (em azul) em contraste com o dado bruto (em preto). No topo, opção de formatação e exportação do gráfico.

4. CONCLUSÃO

O *software* uniTIDE é uma poderosa ferramenta de investigação maregráfica designada tanto para trabalhos tanto em campo quanto em gabinete. Propõe praticidade e agilidade, estando sempre em desenvolvimento e aperfeiçoamento de acordo com as necessidades do usuário. Seus produtos são exportáveis, tanto gráficos quanto texto, e todos seus parâmetros são configuráveis. Em suma, o uniTIDE se adequa às necessidades básicas e avançadas.

REFERÊNCIAS

Ahlberg, Nielson and Walsh (1967). The Theory of Splines and Their Applications. Volume 38, Pages v-viii, 1-284.

Boon, J. D., & Kiley, K. P. (1978). Harmonic Analysis and Tidal Prediction by the Method of Least Squares: A User's Manual. *Special Reports in Applied Marine Science and Ocean Engineering (SRAMSOE) No. 186.* https://doi.org/10.21220/V5PF2T.

Butterworth, S. (1930). On the Theory of Filter Amplifiers. *Experimental Wireless and the Wireless Engineer.* Volume 7, páginas 536–541.

Cooley, James W.; Tukey, John W. (1965). An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. *Mathematics of Computation.* https://doi.org/10.2307/2003354.

Desenvolvimento de algoritmo para previsão 2D e 3D de propagação submarina de raios acústicos com reflexões – ferramentas REOART 2D e REOART 3D

J. Gonçalves (1), M. Gatta (2), C. Costa (3)

(1) CINAV, Escola Naval, IUM, Base Naval de Lisboa, joao.duarte.goncalves@escolanaval.pt.

(2) CINAV, Escola Naval, IUM, Base Naval de Lisboa, mario.gatta@escolanaval.pt.

(3) CINAV, Base Naval de Lisboa, cnlcosta@gmail.com.

Resumo: Utilizando modelos paramétricos 2D e 3D de propagação de raios acústicos deduzidos no passado recente foram desenvolvidos dois programas de propagação de raios acústicos com a capacidade de simular a propagação do som em ambiente oceânico real (REOART 2D e REOART 3D). Estes programas utilizam as bases de dados da GEBCO, da WOD18 e da biblioteca de software TEOS-10, para recolher dados reais referentes à topografia, climatologia da região de simulação e velocidade de propagação do som. As ferramentas desenvolvidas, para além de simularem a propagação de raios acústicos de forma mais realista, incluem também a ocorrência do fenómeno de reflexão do raio acústico (suposta especular) na superfície e no fundo marinho entrando em consideração com a batimetria real. Neste trabalho introduzimos as ferramentas referidas e apresentaremos algumas simulações ilustrativas.

Palavras-chave: propagação acústica 2D, propagação acústica 3D, propagação acústica em ambiente real.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a modelação da propagação acústica submarina têm vindo a ser particularmente desenvolvida e aplicada na resolução de importantes problemas tais como, a previsão sonar (Daljit e Joseph, 1997), entre outros. Diferentes tipos de modelos de propagação têm sido aplicados no desenvolvimento de aplicações computacionais dedicadas ao estudo deste fenómeno. De referir, por exemplo, a utilização de modelos de traçado de raios sonoros baseados na aproximação *eikonal*, modelos baseados na resolução da equação de onda recorrendo a modos ortogonais, modelos baseados em técnicas de geometria diferencial e modelos baseados no princípio do tempo mínimo de Fermat (Rodriguez *et al*., 2021).

O desenvolvimento deste tipo de ferramentas destinadas a simular e a prever o fenómeno de propagação acústica tem uma grande importância nos domínios militar e civil. No campo militar, a previsão sonar permite, por exemplo, identificar sectores nos quais a detecção de alvos não é viável. No contexto civil, este tipo de ferramentas permite, por exemplo, simular e avaliar a exposição de ecossistemas a diferentes tipos de ruído (Etter, 1995).

Foi recentemente desenvolvida, no contexto das atividades do CINAV/Escola Naval, uma aplicação de apoio à previsão sonar (FAPSO - Ferramenta de Apoio à Previsão SOnar) (Marques, 2018). A adição de modelos alternativos de propagação e funcionalidades adicionais às aplicações referidas está na base do presente trabalho. Neste intuito, foram desenvolvidas as aplicações computacionais de propagação acústica submarina denominadas – REOART 2D e REOART 3D (**R**eal **E**nvironment **O**cean-**A**coustic **R**ay **T**racing). Estas recorrem a dois modelos paramétricos 2D e 3D de propagação de raios acústicos submarinos, que têm por base o princípio do tempo mínimo de Fermat, materializados por sistemas de equações algébrico-diferenciais (Raposo, 2019). As aplicações desenvolvidas - REOART 2D e REOART 3D utilizam os atrás referidos modelos paramétricos, as bases de dados da GEBCO (*General Bathymetric Charts of the Ocean*), da WOD18 (World Ocean Database 2018) e a biblioteca de *software* TEOS-10 (*Thermodynamic Equation of State 2010*), e têm a capacidade de simular trajetórias de raios acústicos e respectivas reflexões na superfície e fundo, em ambiente oceânico real (2D e 3D).

2. FUNCIONAMENTO DOS ALGORITMOS DESENVOLVIDOS

Nesta secção irá explicar-se o funcionamento lógico dos algoritmos desenvolvidos através da linguagem MATLAB. Na Figura 1 está representado o fluxograma com as etapas executadas pelos programas REOART 2D e REOART 3D.

A primeira etapa para o cálculo da propagação do raio acústico em ambiente real é a introdução da posição geográfica, do azimute, da distância de propagação e da distância entre posições. Isto permite definir a zona de simulação, podendo ela ser um plano (2D) ou uma área (3D), consoante o programa utilizado. Com a zona de simulação determinada, com recurso às bases

de dados da GEBCO e da WOD18, a segunda etapa é a caracterização da topografia e da climatologia da zona de simulação. A terceira etapa passa pelo cálculo da velocidade de som e respetivos gradientes espaciais da zona de simulação, através da biblioteca TEOS-10 (GSW), determinando assim os campos de velocidade de som e os gradientes. Na quarta etapa é onde é feita a resolução numérica dos modelos de propagação de Raposo (que serão abordados mais adiante) – cálculo da trajetória do raio acústico – e a modelação das reflexões.

De referir que a referenciação relativamente às coordenadas espaciais no meio de propagação de todos os parâmetros físicos e batimétricos necessários ao desenvolvimento dos cálculos e resolução do modelo de propagação, recorreu ao procedimento de interpolação multilinear dos dados discretizados disponíveis nas bibliotecas da GEBCO e da WOD18.

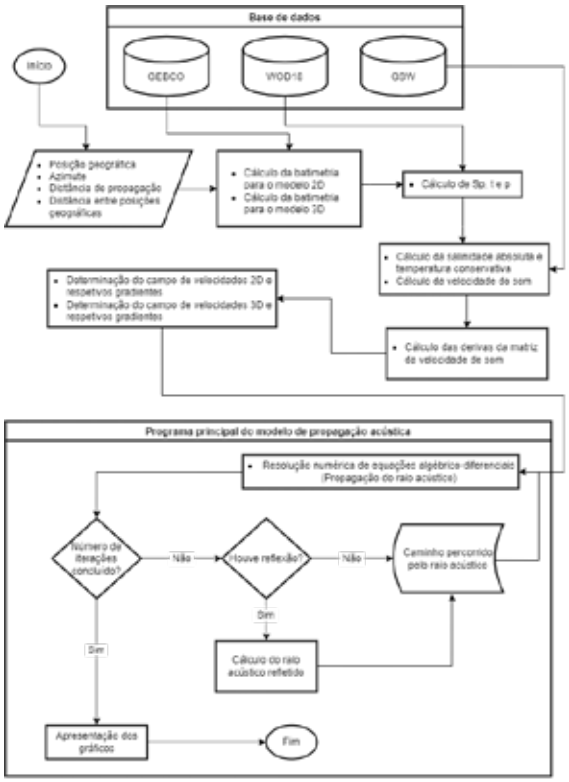


Fig. 1. Fluxograma do funcionamento lógico dos programas REOART 2D e REOART 3D.

3. MODELOS PARAMÉTRICOS DE PROPAGAÇÃO SONORA ACÚSTICA

Os modelos de propagação utilizados nos programas REOART 2D e REOART 3D foram desenvolvidos por Raposo em 2019 (Raposo, 2019). Estes modelos paramétricos de traçado de raios acústicos, são constituídos pelos sistemas de equações algébrico-diferenciais que seguidamente se apresentam e configuram, respectivamente o modelo 2D,

$$\begin{cases} x' - a = 0 \\ y' - b = 0 \\ a'b - b'a + \frac{b}{v(x,y)}\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{a}{v(x,y)}\frac{\partial v}{\partial y} = 0 \\ aa' + bb' = 0 \end{cases}$$

e o modelo 3D,

$$\begin{cases} x' - a = 0 \\ y' - b = 0 \\ z' - c = 0 \\ (1-a')a' + (1-c^2)c' - ac(a'+c') - b(ab'+cb') \\ \quad + \frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z}\left(\frac{dv}{dx}a + \frac{dv}{dy}b + \frac{dv}{dz}c\right)(a+c)\right) = 0 \\ (1-b')b' + (1-c^2)c' - bc(b'+c') - a(ba'+ca') \\ \quad + \frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\left(\frac{dv}{dx}a + \frac{dv}{dy}b + \frac{dv}{dz}c\right)(b+c)\right) = 0 \\ aa' + bb' + cc' = 0 \end{cases}$$

em que *x, y, z*, representam, respectivamente, a posição do raio acústico em coordenadas cartesianas e *v* a velocidade do som.

4. FORMULAÇÃO 2D E 3D EM AMBIENTE REAL

Quando a velocidade de som apresenta gradientes normais ao plano de propagação, o raio acústico não se mantém no plano em causa. Neste caso, a modelação do fenómeno de propagação acústica em 3D será mais realista. Por outro lado, mesmo na ausência de gradientes normais ao plano de propagação, a ocorrência de reflexões no fundo marinho irregular determina em geral o abandono do plano de propagação por parte do raio refletido (Oliveira *et al.*, 2021). Estes factos justificam a importância de se utilizar, nas circunstâncias referidas, um modelo/aplicação que permita simular a propagação de raios acústicos em 3D.

5. REOART 2D e REOART 3D

Como foi referido, os programas REOART 2D e REOART 3D utilizam as bases de dados GEBCO e WOD18 para aceder à informação batimétrica e climatológica. A utilização da biblioteca de *software* TEOS-10 permite efetuar a determinação do campo espacial de velocidade do som na região oceânica considerada.

Refira-se que a base de dados da GEBCO descreve a batimetria na generalidade das regiões terrestres com resolução de 0.5 milhas.

6. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Tendo em vista ilustrar/demonstrar as aplicações desenvolvidas apresentaremos nesta secção simulações de propagação de raios em regiões envolventes a Portugal Continental.

Começaremos por efetuar simulações de propagação e de reflexões de múltiplos raios acústicos com a aplicação REOART 2D. Seguidamente

apresentaremos a simulação da trajectória com algumas reflexões dum único raio acústico, utilizando o programa REOART 3D.

6.1 REOART 2D – simulação numérica com múltiplos raios acústicos

Esta simulação numérica foi realizada na posição geográfica de latitude 39º N e longitude 10.1º W, no azimute 270º, com múltiplos raios acústicos.

Na Figura 2 está representada a área, com os valores batimétricos, envolvente a Portugal Continental e o plano de simulação vertical 2D (a linha vermelha). A linha referida é uma geodésica, calculada através das fórmulas de transporte de coordenadas geodésicas adaptadas do Manual de Hidrografia (Fernandes, 1967).

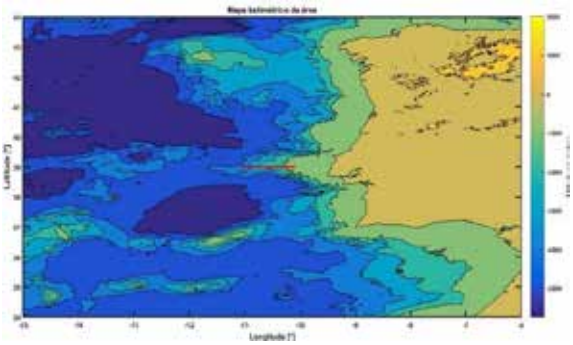


Fig. 2. Mapa batimétrico da área envolvente a Portugal Continental com a representação da trajetória (geodésica).

Na Figura 3 está representado o plano de simulação 2D (a linha vermelha), a rede de dados climatológicos (círculos azuis) e a rede dos dados climatológicos mais próximos do plano de simulação 2D (pontos verdes).

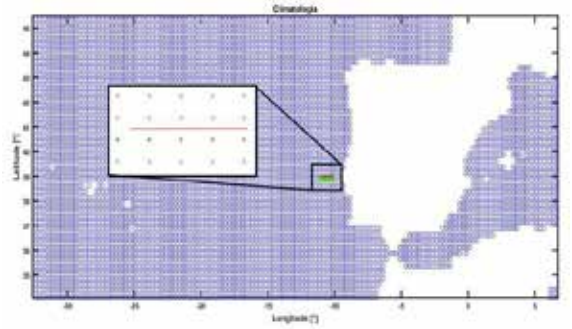


Fig. 3. Mapa com a distribuição dos pontos com dados climatológicos da área envolvente a Portugal Continental com o detalhe da representação da trajetória assumida.

Na Figura 4 está ilustrada a simulação realizada recorrendo à emissão de múltiplos raios acústicos, a um metro de profundidade. Nesta figura é possível observar a reflexão especular nas fronteiras e a refração ao longo da trajetória, satisfazendo qualitativamente a lei de Snell. Esta simulação sugere a robustez e credibilidade do programa REOART 2D.

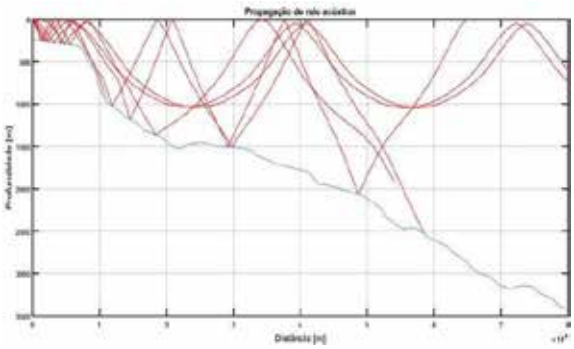


Fig. 4. Representação de uma simulação com múltiplos raios acústicos. utilizando o programa REOART 2D.

6.1 REOART 3D – simulação numérica com um raio acústico

A simulação numérica com o programa REOART 3D foi realizada na posição geográfica de latitude 36.9º N e longitude 9º W, com um único raio acústico, a uma profundidade de cem metros. Na Figura 5 está representada a área, com os valores batimétricos, envolvente a Portugal Continental e a área de simulação 3D (quadrado vermelho).

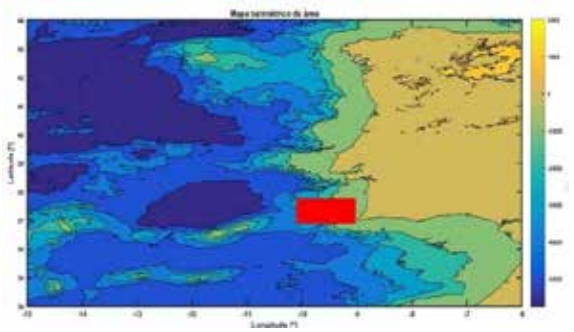


Fig. 5. Mapa batimétrico da área envolvente a Portugal Continental com a área de simulação 3D (assinalada a cor vermelha)

Na Figura 6 representamos a rede dos dados climatológicos consultados pela aplicação.

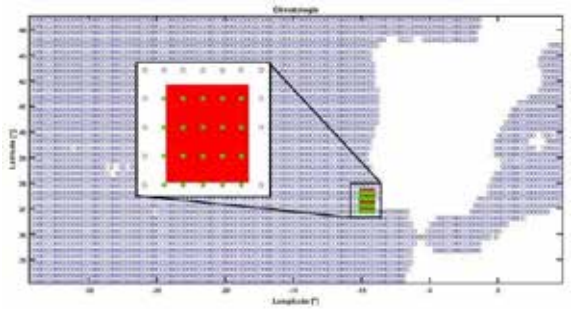


Fig. 6. Mapa com a distribuição dos pontos com dados climatológicos da área envolvente a Portugal Continental com o detalhe da representação da área de simulação 3D.

Nas Figuras 7 e Figura 8, ilustramos a simulação efetuada onde podemos observar algumas reflexões do raio acústico ao longo do seu trajecto, na superfície e no fundo. Uma vez que o tempo de cálculo para gerar a simulação 3D revelou-se substancialmente longo optámos por ilustrar apenas um trajecto compatível com o tempo de cálculo disponível.

Naturalmente, a presente simulação ilustra/demostra nesta fase de desenvolvimento da aplicação REOART 3D apenas o seu "conceito" e sugere a necessidade de se optimizar os algoritmos utilizados.

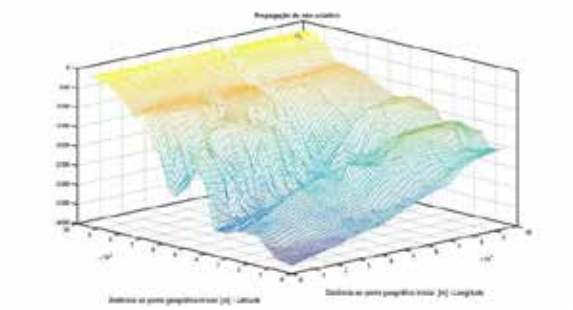


Fig. 7. Representação de uma simulação com um raio acústico, utilizando o programa REOART 3D.

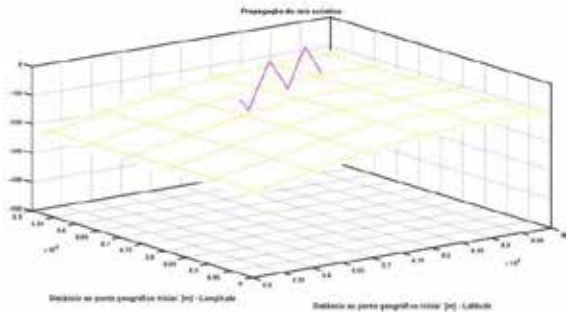


Fig. 8. Representação de uma simulação com um raio acústico, utilizando o programa REOART 3D.

7. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Os resultados das simulações apresentadas são credíveis.

A consideração de reflexões nos trajectos dos raios acústicos simulados pelas aplicações desenvolvidas acrescenta realismo no fenómeno de propagação do som num ambiente real.

A disponibilidade duma aplicação 3D funcional para simulação do trajeto de raios acústicos em ambiente real pode ser importante e vantajoso em aplicações especializadas, nomeadamente em zonas com gradientes transversais de velocidade do som importantes tais como na vizinhança de fontes hidrotermais.

Os resultados preliminares das simulações numéricas sugerem o desenvolvimento futuro das seguintes ações:

1. Validação das aplicações desenvolvidas recorrendo a aplicações disponíveis comercialmente;
2. Optimização das aplicações e desenvolvimento dum interface amigável para a sua utilização;
3. Integração das aplicações REOART 2D e REOART 3D na ferramenta FAPSO.
4. Adicionar a consideração do fenómeno de absorção acústica nos modelos de propagação das aplicações REOART 2D e REOART 3D.

REFERÊNCIAS

Daljit S. Ahluwalia and Joseph B. Keller (1997). *Wave propagation and underwater acoustics*. Springer.

Etter, P. C. (1995). *Underwater acoustic modeling: principles, techniques and applications*. CRC Press.

Fernandes, J. B. (1967). *Manual de Hidrografia*. Instituto Hidrográfico.

Marques, P. A. V. (2018). *Acústica submarina: Desenvolvimento de modelo de previsão de propagação acústica global*. Escola Naval.

Orlando Rodriguez, Sérgio de Jesus e Rogério M. Calazan (2021). *Fundamentos de acústica submarina*. Universidade do Algarve.

Raposo, P. A. M. A (2019). *Estudo da propagação acústica em 3D em meios não homogéneos – Raytracing baseado no princípio de Fermat*. Escola Naval.

Tiago C. Oliveira, Ying-Tsong Lin and Michael B. Porter (2021). *Underwater sound propagation modeling in a complex shallow water environment*. Frontiers in Marine Science, 1460-1464.

Assessing wave-induced flooding risks at the Algarve coast for current and future conditions

J. L. Garzon (1), A. C. Zózimo (2), Ó. Ferreira (1), A. M. Ferreira (2), C. J. E. M. Fortes (2), M. T. Reis (2)

(1) CIMA – Centre for Marine and Environmental Research, FCT, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal. jlhervas@ualg.pt.

(2) Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

Abstract: Wave-induced flooding represents a threat and sea-level rise will exacerbate the problem. Bayesian Network tools that surrogate hydrodynamic and risk models were designed to predict risks induced by overwash/overtopping at Praia de Faro and Quarteira (Portugal) for current and future conditions. A 23.5 year-dataset of oceanic conditions for the 1996-2020 period was used to assess the average number of hours per year (h/yr) with risks for coastal receptors today. Then, sea-level rise projections from IPCC were considered to compute h/yr with risks by 2050 and 2100. The results revealed that today, the risk for pedestrians at Praia de Faro is higher than at Quarteira (13 h/yr against 1 h/yr) and is expected to increase by a factor of 2 by 2050 and by 4-6 times by 2100. At Quarteira, the risk conditions for pedestrians are not anticipated to change by 2050, but are expected to increase by a 3-4 factor by 2100.

Keywords: Bayesian network, coastal flooding, sea-level rise, wave overtopping, XBeach.

1. INTRODUCTION

Coastal flooding is threatening many low-lying areas while population growth exacerbates the risks. This is particularly relevant for low-lying areas, where waves overtopping coastal defences (e.g. seawalls or dunes) can induce important damage in hinterland areas. Also, the vulnerability of coastal communities is projected to highly increase in a scenario of climate change, with sea-level rise (SLR) being one of the main agents responsible for enhancing the risks (Vousdoukas *et al*., 2018). SLR will contribute to increase the frequency and magnitude of the flood events (Ranasinghe, 2016). Therefore, if adaptation measures to climate change are not implemented, vast new areas can be impacted by coastal floods while others will face an increase in flood intensity and occurrence.

Several approaches, such as artificial neuronal networks (Coeveld *et al.*, 2005), empirical formulae (EurOtop, 2018), physical models (Geeraerts *et al.*, 2007), numerical models (Manz, 2021) and statistical tools (Plomaritis *et al.,* 2018), are available to compute wave-induced overtopping over a coastal structure that can result in a flood event. Among those approaches, Bayesian Networks (BNs) are probabilistic models that examine the correlation between variables and can be used to predict coastal applications (after training). These systems are data-intensive, requiring large input information to derive the probabilistic relationships used in their predictions. Under the lack of field observations, calibrated and validated process-based models can be used to generate the required information.

Within the EW-Coast project (Garzon *et al.*, 2022), BNs were designed to predict risks associated with coastal storms at two sites on the Southern coast of Portugal: Praia de Faro and Quarteira. In this study, the BNs previously developed for both sites were used to investigate the risks associated with coastal flooding for pedestrians, properties and vehicles considering present and future conditions.

2. STUDY CASES

Praia de Faro is an open beach located in the Peninsula of Ancão, a narrow sand barrier that separates the Atlantic Ocean and a coastal lagoon. The average beach slope is around 0.10 during calm conditions (Vousdoukas *et al.*, 2012). The area investigated here is in front of a parking lot, where a walking wooden path marks the edge of the urbanized area (Fig. 1a). The elevation of this path is 4.6 m above mean sea level (MSL) and the beach width is approximately 40 m. These features make this site highly vulnerable to wave overtopping (Almeida *et al.*, 2012). Quarteira is located ten kilometres NW from Praia de Faro. This is an urban beach with rocky groins and limited by a promenade (Fig. 1b) with an elevation of 5.5 m above MSL at the backside. This site has a similar average beach slope, 0.10, and a beach width of more than 60 m (Garzon *et al.*, 2020). Both sites are exposed to W–SW wave dominant conditions and are relatively protected from E–SE. Therefore, only storms with directions greater than 180º N can create flood conditions (Ferreira *et al.*, 2021). The mean tidal range in the region is about 2.2 m, with maximum ranges of 3.5 m during spring tides.

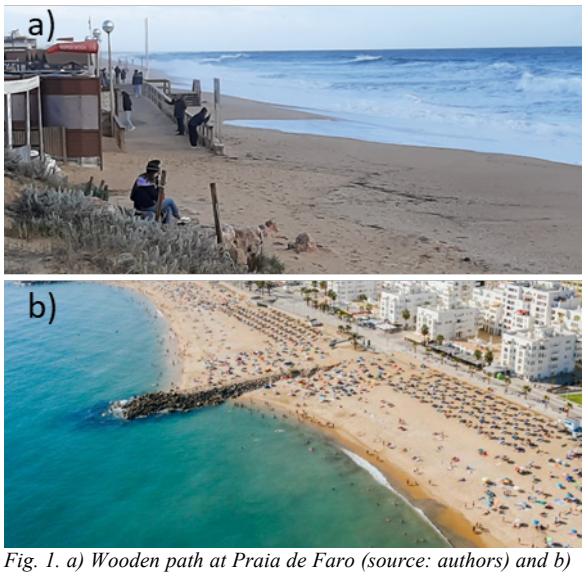


Fig. 1. a) Wooden path at Praia de Faro (source: authors) and b) the promenade at Quarteira (source: Google).

3. METHODS

3.1. Bayesian network training

Based on the 23.5 years of input data, the Bayesian Networks evaluated the correlation between the input variables and risks in coastal receptors. To create comprehensive information to train the BNs, a numerical framework that computes wave overtopping was coupled with a risk model to identify risk conditions induced by a set of synthetic sea states or events.

The considered input variables of the sea states were significant wave height (Hs), peak wave period (Tp) and total water level (TWL). The synthetic events were built by combining a wide range of these three input variables. Regarding Hs and Tp, the values ranged from 1 m to 9 m and from 8 s to 19 s, respectively, while the considered TWL variability was between 0.25 m and 2.5 m (above MSL). The lower limits were selected based on the authors' experience and field observations (more than 20 years at Praia de Faro). The upper limits correspond to return periods of the order of 100 years for both Hs and TWL, and to the maximum recorded value of Tp. Then, the variables defining the sea states were discretized in bins of 0.5 m and 1 s for the wave parameters, and in bins of 0.25 m for TWL. This discretization of the wave variables allowed to include in the analysis two types of events: 1) storm events characterized by Hs larger than 3 m and 2) swell events whose Hs is lower than 3 m and Tp is higher than 13 s.

These events were implemented in SWAN, which downscaled the wave conditions from deep water to nearshore areas, where XBeach (one-dimensional 'non-hydro' model, Roelvink *et al.*, 2009) simulated nearshore wave processes and run-up incursions. After a warm-up period, all XBeach runs simulated 600 waves that multiplied by their mean period, estimated with the up-crossing method, resulted in the time used to compute the mean wave overtopping discharge (q). To better account for the stochastic effects of the wave overtopping process and obtain risk probability information associated with each storm condition, five synthetic storms, with their values randomly selected, were included to train each bin of the BNs.

Regarding the risk model used to create the training data, EurOtop (2018) provides recommendations for tolerable overtopping limits for pedestrians, vehicles (cars) and properties (potentially weak elements like doors and windows) as displayed in Tab. i. Using these limits, the mean discharge simulated by XBeach was used to establish risk conditions. Among the 5 storms within each bin, the risk was defined based on the worst-case scenario.

Tab. i. Mean wave overtopping discharge (q) limits for establishing risks in coastal receptors.

	Pedestrians	Properties	Vehicles
q (l/s · m)	0.3	1.0	5.0

3.2. Oceanographic data

Oceanographic data used into the BNs consisted of hourly wave climate, astronomical tides and storm surges corresponding to the 23.5-year period of 1996-2020. Then, the average number of hours per year (h/yr) with risk conditions was calculated. The wave parameters, such as Hs, Tp and direction, were collected by the Faro Buoy, at 100 m depth. The surge data were measured at the Huelva tidal gauge, located 60 km from the sites, and the astronomical tide was extracted from XTide (https://flaterco.com/xtide/). The effects of climate change, namely the rise of the mean sea level, are incorporated by adding to the astronomical tide the sea-level-change scenarios presented by IPCC (Masson-Delmotte *et al.*, 2021) at the station of Lagos, southern Portuguese coast (https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool). Thus, the number of h/yr with risk conditions was evaluated for 5 scenarios: present conditions and both the SSP2-4.5 (intermediate future Greenhouse Gas Emissions) and SSP5-8.5 (very high future Greenhouse Gas Emissions) scenarios for 2050 and 2100. The projected SLRs for those scenarios at mid-century are, respectively, 0.23 m and 0.26 m, while by the end of the century, changes of 0.6 m and 0.8 m are expected. Wave parameters and surge stationarity were considered and the same dataset of oceanographic conditions (1996-2020) was used to calculate the h/yr for future conditions, with the astronomical tide input varying according to each studied IPCC scenario. Furthermore, it was assumed that the crests of the flood defences and the beach morphology will not be altered (i.e., no adaptation).

4. RESULTS AND DISCUSSION

At Praia de Faro, for the 23.5-year period (~206000 hours) evaluated here, 307 hours have shown potential risks for pedestrians, 174 hours for properties and 22 hours for vehicles, under present conditions. This total number of hours corresponds to 13 h/yr under risk conditions for pedestrians, 7 h/yr for properties and 1 h/yr for vehicles (Tab ii). For the 23.5 years with the IPCC 2050 scenarios, the projected h/yr with risks for pedestrians and properties will approximately double the present ones, with the very high gas emission scenario accounting for 2 h/yr more with risks for both receptors than the intermediate one (Tab ii). The expected risks for vehicles will increase until 2-3 h/yr with SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, respectively. By the end of the current century and under an intermediate gas emission scenario, the number of hours per year with risks for pedestrians and properties will be multiplied by 4-5 in relation to present conditions, while for vehicles, it will increase by 10 times. On the other hand, for a very high gas emission scenario, the number of h/yr with risks for pedestrians and properties will increase by factors of 6 and 7 and the vehicles by a factor of 16 in regard to the present (Tab ii). The increase of hours with risks found here for 2050 and 2100 scenarios is larger than the hazard increase found by Ferreira *et al*. (2021) for Praia de Faro, as they projected a rise in events' frequency of 1.5 and 2.7 for those years, respectively. Nevertheless, these projected events will last longer as the SLR will induce a longer duration of overtopping. Thus, it is expectable that the increase in duration is higher than the increase in the number of events.

Tab. ii. Number of hours per year (h/yr) under risk conditions. Values in [] indicate the two IPCC scenarios assessed.

	Praia de Faro		
	Pedestrians	Properties	Vehicles
Present	13	7	1
2050	[25 - 27]	[14 - 16]	[2 - 3]
2100	[53 - 73]	[35 - 49]	[10 - 16]
	Quarteira		
	Pedestrians	Properties	Vehicles
Present	1	< 1	< 1
2050	[2 - 2]	[1 - 1]	[< 1 - < 1]
2100	[3 - 4]	[2 - 3]	[< 1 - < 1]

The nature of the event, storm or swell conditions, inducing coastal flooding and its evolution along the century were further investigated at Praia de Faro. For present conditions, risk events for pedestrians were dominated by storm events while the swell events promoted risks only 1/4 of the hours. For properties and vehicles, only 10% and 5% of the risk situations were induced by swell events, respectively (Fig. 2). For the 2050 very high gas emission scenario, swell events will induce more than 1/3 of the hours under risk conditions for pedestrians and about 15% for properties and vehicles (Fig. 2). For the 2100 scenario, both events (storm and swell) will contribute similarly to the number of hours per year with risk for pedestrians, but storm conditions will induce about 2/3 of the risk situations for properties and vehicles (Fig. 2).

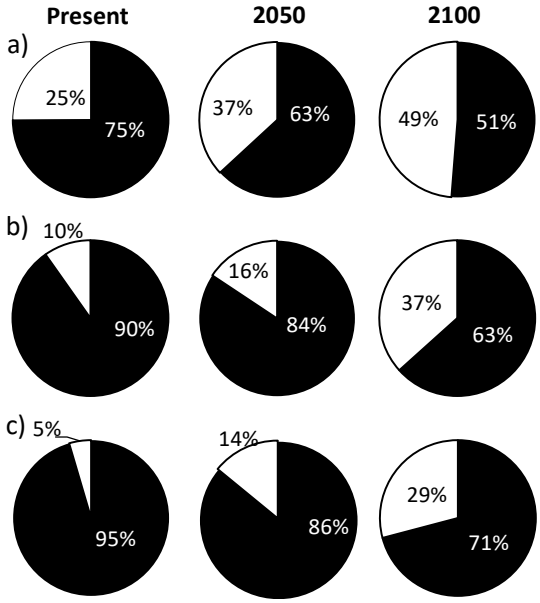


Fig. 2. Hour distribution of risk for pedestrians (a), properties (b) and vehicles (c) for present and future conditions under the SSPS4-8.5 scenario at Praia de Faro. Black corresponds to storm events and white to swell events.

At Quarteira, for present conditions, the number of h/yr under risk conditions is remarkably lower than that at Praia de Faro, with only 1 h/yr for pedestrians and less than 1 h/yr for properties and vehicles (Tab ii). For the two 2050 gas emission scenarios, the hours with risk will slightly increase by 1 h/yr for pedestrians and properties while vehicles will not experience more hours per year under risk. For the 2100 scenario, for the intermediate gas emission scenario, pedestrians and properties will be subject to 3 h/yr and 2 h/yr, respectively, and for the high gas emissions scenario, the risk situations will increase up to 4 h/yr and 3 h/yr. Vehicles will not experience more than 1 h/yr under risk by 2100.

For present conditions, at Quarteira, the risk conditions for pedestrians were driven mainly by storm events (89%). Conversely to Praia de Faro, the impact of swell events at this site is not expected to significantly increase over the century (Fig. 3).

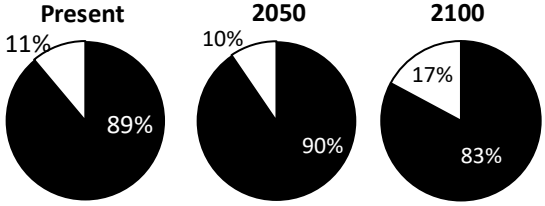


Fig. 3. Hour distribution of risk for pedestrians for present and future conditions under the SSPS4-8.5 scenario at Quarteira. Black corresponds to storm events and white to swell events.

5. CONCLUSIONS

The information generated by the EW-Coast project was used to assess the vulnerability of coastal receptors at two sites on the southern coast of Portugal. Pedestrians at Praia de Faro were found to be importantly more vulnerable than at Quarteira for current conditions (13 h/yr against 1 h/yr). Moreover, risk conditions for this receptor are expected to increase by a factor of 2 by the middle of the century and by 4-6 times until 2100. Pedestrians at this site are more exposed to storm events today, but swell events will increase their contribution to coastal flooding through the century until reaching a similar contribution to that of the storm events. At Quarteira, the risk conditions for pedestrians are not anticipated to change significantly by 2050, and by 2100 they will increase by a 3-4 factor. However, the number of hours per year with risks is expected to be remarkably lower than at Praia de Faro by 2100 (4 h/yr against 73 h/yr in the SSPS8-8.5 scenario). Also, at Quarteira, the risk situations will be mainly caused by storm events.

Acknowledgments

The authors acknowledge FCT funding to CIMA through grant UIDP/00350/2020 and the research projects EW-COAST (ALG-LISBOA-01-145-FEDER-028657) and To-SEAlert (Ref. PTDC/EAM-OCE/31207/2017). The Instituto Hidrográfico and Puertos del Estado are acknowledged for supplying wave and water level data, and Sebastião Teixeira (APA) for providing the bathymetric data. The COSMO Program under *Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental* (COSMO), of APA, co-funded by the *Programa Operacional Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos* (POSEUR), is also acknowledged.

REFERENCES

Almeida, L. P., Vousdoukas, M. V., Ferreira, Ó., Rodrigues, B. A., & Matias, A. (2012). Thresholds for storm impacts on an exposed sandy coastal area in southern Portugal. *Geomorphology*, *143–144*, 3–12.

Coeveld, E. M., Van Gent, M. R. A., & Pozueta, B. (2005). *Neural network manual for NN_Overtopping program*. *CLASH WP8, WL Delft Hydraulics*. Delft, The Netherlands.

EurOtop. (2018). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application.* (Second Ed.). Van der Meer, J. W., Allsop, N. W. H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch P. and Zanuttigh, B.

Ferreira, Ó., Kupfer, S., & Costas, S. (2021). Implications of sea-level rise for overwash enhancement at South Portugal. *Natural Hazards*, (0123456789).

Garzon, J., Ferreira, A., Ferreira, Ó., Fortes, C., & Reis, M.T. (2020). *Beach State Report: Quarteira, Praia de Faro and Costa da Caparica*. Report of the EW-Coast project.

Garzon, J. L., Zozimo, C., Ferreira, A. M., Ferreira, Ó., Fortes, C. J. E. M., & Reis, M. T. (2022). Early Warning System development: Quarteira and Praia de Faro. Report of the EW-Coast project.

Geeraerts, J., Troch, P., De Rouck, J., Verhaeghe, H., & Bouma, J. J. (2007). Wave overtopping at coastal structures: prediction tools and related hazard analysis. *Journal of Cleaner Production*, *15*, 1514–1521.

Manz, A. (2021). *Application of SWASH to storm events in the port of Ericeira and its introduction into HIDRALERTA system*. Master's thesis, University of Algarve, Portugal.

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., et al. (2021). *IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Vol. 1.

Plomaritis, T. A., Costas, S., & Ferreira, Ó. (2018). Use of a Bayesian Network for coastal hazards, impact and disaster risk. *Coastal Engineering*, *134*(February 2017), 134–147.

Ranasinghe, R. (2016). Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review. *Earth-Science Reviews*, *160*, 320–332.

Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, *56*(11–12), 1133–1152.

Vousdoukas, M. I., Almeida, L. P. M., & Ferreira, Ó. (2012). Beach erosion and recovery during consecutive storms at a steep-sloping, meso-tidal beach. *Earth Surface Processes and Landforms*, *37*(6), 583–593.

Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Jevrejeva, S., Jackson, L. P., & Feyen, L. (2018). Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nature Communications*, *9*(1), 1–12.

ADCP backscattering patterns in a mid-shelf water column (Figueira da Foz – W Portugal): interaction between physical/biological forcing and particle dynamics

A. I. Santos (1), J. Magalhães (2), A. Oliveira (1), P. B. Oliveira (3), R. Nolasco (4), N. Zacarias (1), A. Amorim (5)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisbon, Portugal; ana.santos@hidrografico.pt.

(2) Interdisciplinary Centre of Marine and Environmental Research (CIIMAR), 4450-208 Matosinhos, Portugal

(3) Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), Algés, Portugal

(4) Centre of Environmental and Marine Studies (CESAM), Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal

(5) Centro de Ciências do Mar e do Ambiente (MARE), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal

Abstract: Project HabWAVE investigates the physical and biological processes that determine HAB initiation, emphasizing on the benthic resting stages (cysts) of some species, and the potential role of Internal Solitary Wave (ISW) activity on the water column's particle dynamics. To this end, a mooring line was deployed at ≈115 m depth offshore Figueira da Foz. The mooring line was equipped with a 300 kHz ADCP and a 5-thermistor chain recording the currents, acoustic backscatter intensity and temperature patterns in the top 100 m of the water column for a 12-day period (Sept 2019). This work addresses the complex interplay of backscattering patterns resulting from the interaction of particles (mostly planktonic organisms) with physical forcing, namely, the behavior change in vertical migration of zooplankton; retention of particles in the thermocline and the clear interaction between the passage of ISW and the overall backscattering structure of the water column.

Key words: ADCP, HAB's, ISW, particles, zooplankton.

1. INTRODUCTION

Project HabWAVE (from benthic resting stages to HAB events: understanding the role of physical-biological coupling off NW Portugal), investigates the processes that determine harmful algae bloom (HAB) initiation, emphasizing on the benthic resting stages (cysts) of some dinoflagellate species. Under the scope of this project, this work describes the complex interplay of patterns, resulting from the interaction of particles (mostly planktonic organisms) with physical forcing, in an attempt to understand which dynamic mechanisms have the potential to generate HAB blooms along coastal areas.

ADCP (acoustic Doppler current profilers) backscatter (ABS) has been used to estimate suspended sediment concentration, and sometimes size, in various environments, given that some calibration procedures are taken into consideration (Santos *et al*., 2020 and references therein). Additionally, ABS has been proven to be a useful tool to describe spatial and temporal patterns in the distribution of zooplankton biomass in many oceanic regions. In their pioneer study, Flagg and Smith (1989) introduced a method to convert the backscatter intensity measured by ADCPs to biomass, however, since the ability to determine accurate biomass estimates from acoustic survey techniques is dependent on a detailed knowledge of the target strength of different target species, the use of single-frequency ADCPs to investigate zooplankton abundance is restricted to a commonly accepted qualitative analysis (Cisewski *et al*., 2010 and references therein).

2. DATA AND METHODS

The HabWAVE'19 multidisciplinary survey (Sept. 2019) consisted in three complementary activities: i) the deployment of an instrumented mooring line (this work, Oliveira *et al*., 2020a, Magalhães *et al*., 2022); ii) shipborne observations at a fixed station covering the ~100m depth water column near the mooring position (Oliveira *et al*., 2020b); and iii) repeated cross-shore transects at 40.22 ºN extending from the coast to ~25 nm offshore (eg. Moita *et al*., 2021).

The mooring line was deployed at the 113 m isobath off Figueira da Foz (W Portugal) and operated from 7-19 September 2019. It was equipped with five self-recording thermistors (nominal depths of 16, 27, 38, 50 and 62 m) and two ADCPs (see Fig. 1 for location). The up-looking 300 kHz and the down-looking 1200 kHz ADCPs were mounted in a dual frame at ~100 m depth. All instruments operated with a sampling interval of 30 s (Oliveira *et al*., 2020a).

This work focuses on the ABS data collected by the up-looking 300 kHz ADCP, interpreted as a proxy of suspended particles in the upper ≈100 m of the water

column. The ADCP's ABS is stored by default to check the quality of the current (intensity and direction) measurements. Presently, many researchers use this data as a surrogate measurement of suspended particles.

ABS profiles retrieved from the ADCP, were converted from echo intensity counts into dB, according to Goustiaux and Van Haren (2010) and corrected to account for geometrical spreading and fluid attenuation and retrieve the fluid "corrected" backscatter (e.g. Santos *et al*., 2020 and references therein), herewith referred as FCB. To enhance the temporal variability patterns, FCB values were normalized via the z-score transformation where z-score= $(x-\mu)/\sigma$, where μ and σ are the mean and the standard deviation for FCB measurements during the whole measuring period in all vertical measuring cells (bins).

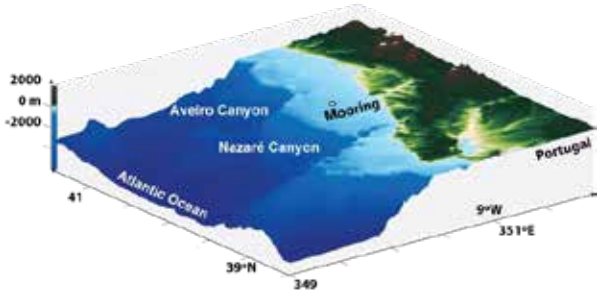


Fig.1. Bottom bathymetry off the western Iberian coast. The study region is set between the Aveiro and Nazaré canyons.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The HabWAVE'19 survey observation period, was planned to enclose the mid-September spring tides, coinciding with a short-pulse (~2 day) of intense upwelling favorable northerly winds (> 0.1 N/m^2). Wind conditions were associated with a ~1.5 ºC drop on sea surface temperature that reached ~ 16 º C one day after the Sept. 10 wind stress peak (Oliveira *et al*., 2020a). In the water column, based on CTD observations, Oliveira *et al*. (2020b) described a well-defined thermocline with variable depth along the semi-diurnal tidal cycle. CTD turbidity data revealed that the study area was characterized by values indicating a generally low concentration of suspended particles (<2.5 FTU). As far as ABS data is concerned, Oliveira *et al*. (2020a) described a periodic fluctuation of the 300 KHz ADCP FCB linked to the diurnal cycle from 7-15 Sept., with FCB maxima observed during the night and relatively low values during the day. In the last 4 days of observations (15-19 Sept.) this pattern vanished and FCB increased throughout the water column. A closer inspection into each individual 24-hour period of observations confirms the description of Oliveira *et al*. (2020a), revealing a complex particle dynamics pattern, working at several frequencies and evolving throughout the measuring period.

The scatterer distribution in the water column offshore Fig. da Foz was related with the water column's density structure, with an accumulation of scatterers along the thermocline interface (represented by the 14ºC isotherm in Fig. 2c, image key **1**). This accumulation is especially clear during the night, although after Sept. 16th this accumulation is also present during the day.

The effect of water column density stratification on the scatterer pattern is ubiquitous to the whole water column, and is especially evident during Internal Solitary Wave (ISW) events. Previous studies have shown a strong activity of ISWs over the Portuguese shelf during late spring and summer and the discussed dataset is no exception (Oliveira *et al*., 2020a, Magalhães *et al*., 2022 and references therein). These waves are readily observed in radar satellite images as well as in-situ data (e.g. Magalhães *et al*., 2022), and are linked to a variety of oceanographic processes, from sediment resuspension (Quaresma *et al*., 2007) to the modulation of near-surface chlorophyll-a distribution and primary production (Oliveira *et al*., 2020a). In this dataset, ISW events are represented by significant fluctuations in thermocline depth (Fig. 2c, image key **2**), in the order of 10-30 m, reaching maxima of ≈ 40 m (see Fig. 2b and 2c), and occurring independently of the semi-diurnal tidal phase or time of day. These thermocline fluctuations affect not only the depth of the scatterer maxima accumulated at the thermocline depth, but also the particle patterns throughout the whole observed 90 m water column. In fact, in some occasions, there is some evidence of an anti-correlation effect between the thermocline depth and the occurrence of FCB maxima "bursts" at mid-water column (≈ 80-90 m depth, not shown in Fig. 2): FCB maxima occur immediately after the ISW passage.

At a lower frequency, the diurnal frequency described by Oliveira *et al*. (2020a) is governed by two main phenomena: diel vertical migration (DVM) (Fig. 2c, image key **3**) and the apparent horizontal advection of particle (scatterer) rich water masses (Fig. 2c, image key **4**) crossing the observation point. DVM is defined as the synchronized movement of zooplankton and fish up and down in the water column over a daily cycle. It is a ubiquitous phenomenon in marine and freshwater pelagic communities, involving a taxonomically diverse array of animals. Organisms migrate most commonly upwards towards the surface at dusk and descend back to deeper water before dawn, but reverse patterns may also occur. DVM has been described by several authors as occurring as an organism's response to avoid predation in the presence of light (Brierley, 2014).

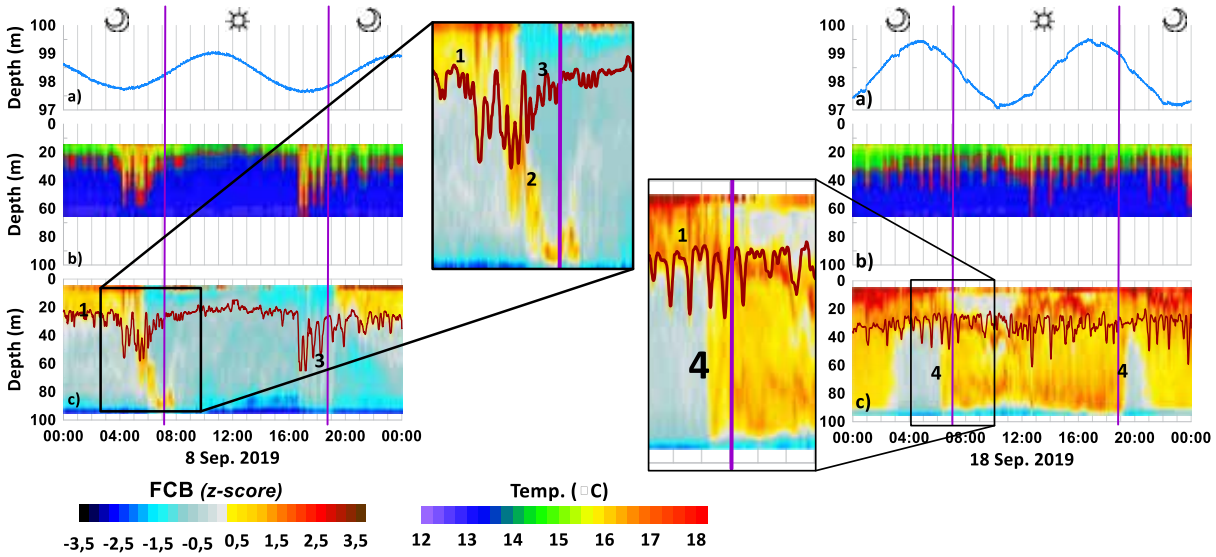


Fig. 2. 24-hour distribution of: ***a)*** *depth measured at the 300 kHz ADCP transducer,* ***b)*** *water temperature measured by the thermistor chain (15-≈60 m water depth) and* ***c)*** *ADCP fluid corrected backscatter normalized for the 12-day measuring period (z-score). The brick line marks the depth of the 14 ºC isotherm and the purple vertical lines mark sunrise and sunset. Two distinct days of the observation period are represented: beginning (8 Sept) and end (18 Sept.), illustrating the significant temporal evolution of the scatterer's distribution in the water column. Image keys:* ***1)*** *Scatterer accumulation along thermocline interface;* ***2)*** *Effect of thermocline oscillation and ISW on scatterer distribution;* ***3)*** *DVM;* ***4)*** *Horizontal advection of scatterer rich water masses across the observation point.*

In HabWAVE'19 mooring observations, the occurrence of a FCB maxima descending from the surface to the bottom at sunrise and a second maximum "moving" in the opposite direction at dusk is observed in the first days of observations, clearly coinciding with DVM patterns, resulting in an almost "clear" water column during the day, with maximum concentration of particles during the night (7-14 Sept.). After Sept. 15th-16th, the scatterer distribution patterns in the observed water column start to change. First, a FCB maxima appears during the day at about 80 m depth on Sept. 15th, and after Sept. 16th, scatterer accumulation along the thermocline interface persists during the day and night. After Sept. 17th, the 80 m and thermocline maxima "fuse" together and the entire observed water column is characterized by FCB values well above the average for the whole observation period. This overall increase in scatterer presence in the water column seems to mask the DVM pattern, which is not observable in the last 3 days of observations. In these last 3 to 4 days of observation, the scatterer pattern in the observation point is characterized by alternation of presence/ absence of particles occupying the whole water column, and this alternation between minima and maxima is apparently instantaneous, not suggesting a particle migration along the water column as in the case of DVM. This pattern is probably due to the horizontal advection of "scatterer rich" water masses through the observation point, which are present at some periods of the day, and absent during others. In Fig. 3a, a satellite image of the of the study area taken on 11:40 on Sept. 15th (just before the whole study area was completely obliterated for satellite imagery by the presence of clouds), clearly shows that the highly heterogeneous spatial distribution of scatterer concentrations (see differences in water color along the area surrounding the mooring position). Surface current model results obtained for the time of the satellite image show current maxima coming from both the north and south and converging at the mooring position (Fig. 3b), confirming the possibility that the occurrence of instantaneous FCB maxima appearing at the mooring position are due to the horizontal advection of scatterer rich water masses in transit.

4. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

HabWAVE'19 mooring data revealed that particle dynamics in the study area are affected by hydrodynamic forcing agents operating at different time scales: the seasonal presence of a stratified water column which, in turn, increases the propensity for the occurrence of high frequency ISW events (in the order of minutes), and the diurnal cycle of DVM. The concentration of sound scatterers at the observation point is also dependent on prevailing current direction and spatial heterogeneity of water masses, in transit through the observation point.

Future work on this dataset and additional data collected during HabWAVE will focus on trying to understand which dynamic mechanisms have the potential to generate HAB blooms along coastal areas, specifically on whether ISW events have the ability to ressuspend bottom settled material (including cysts), as suggested by Quaresma *et al.* (2007).



Fig. 3. Sentinel 2 true color satellite image representative of 12:00 - Sept. 15th showing the heterogeneity of scatterer concentration in water masses present at the surface surrounding the mooring position (https://sentinelshare.page.link/zkJG).

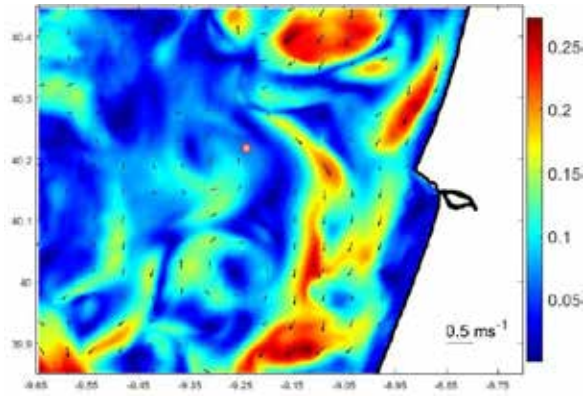


Fig. 4. Daily averaged current intensity. Model simulation for Sept. 15th, 12:00 (model CROCO (Coastal and Regional Ocean COmmunity model, v1.0, https://www.croco-ocean.org). Red marker represents mooring position.

Acknowledgements

Project HabWAVE is co-financed by the EU, through ERDF programs Lisbon Regional Operational Program (PORLisboa) and Portugal 2020, and by FCT/MCT national funds, within project LISBOA-01-0145-FEDER-031265. Ana Amorim also acknowledges the support of FCT, I.P. through the strategic project UIDB/04292/2020. The authors greatly appreciate the collaboration of NRP's "Alm. Gago Coutinho" and "Auriga" crews as well as all the colleagues from the HabWAVE team that participated in this work.

REFERENCES

Brierley, A. S. (2014). Diel vertical migration. *Current biology*, 24(22), R1074-R1076.

Cisewski, B.; Strass, V. H.; Rhein, M. & Krägefsky, S. (2010). Seasonal variation of diel vertical migration of zooplankton from ADCP backscatter time series data in the Lazarev Sea, Antarctica. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, V. 57- 1, Pp. 78-94, https://doi.org/10.1016/j.dsr.2009.10.005.

Flagg, C.N. & Smith, S.L. (1989). On the use of the acoustic Doppler Current profiler to measure zooplankton abundance. *Deep-Sea Research* 36, 465–474

Gostiaux, L. & van Haren, H., 2010. Extracting meaningful information from uncalibrated backscattered echo intensity data. *Journal of Atmospheric and Oceanographic Technology* 27, 943–949. https://doi.org/10.1175/2009JTECHO704.1

Magalhães, J. M.; da Silva, J.C.B.; Nolasco, R.; Dubert, J. & Oliveira, P.B. (2022). Short timescale variability in large-amplitude internal waves on the western Portuguese shelf. *Continental Shelf Research* (submitted)

Moita, M.T.; Oliveira, P.B.; Borges, C.; Palma, C.; Santos, A.I.; Zacarias, N. & Amorim, A. (2021). Protoceratium reticulatum bloom in NW Iberia mid-shelf waters, 19th International Conference on Harmful Algae (ICHA), La Paz, Mexico (online event), October 10-15, 2021

Oliveira, A.; Santos, A.I.; Oliveira, P.B.; Zacarias, N. & Amorim, A. (2020b). Dynamics of Nepheloid layers associated with internal wave activity off Figueira da Foz A. *6as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa 23-25 junho 2020

Oliveira, P.B.; Magalhães, J.M.; Pires, A.C.; Oliveira, A. & Santos A.I. (2020a). Mid-shelf internal wave activity off Figueira da Foz in September 2019. *6as Jornadas de Engenharia Hidrográfica,* Instituto Hidrográfico, Lisboa 23-25 junho 2020

Quaresma, L.; Vitorino, J.; Oliveira, A. & da Silva, J. (2007). Evidence of sediment resuspension by nonlinear internal waves on the western Portuguese mid-shelf. *Marine Geology*, 246:123-143.

Santos, A.I.; Oliveira, A.; Carinhas, D.; Pinto, J.P.; Zacarias, N. & Freitas, M.C. (2020). The acoustic properties of in-situ measured suspended sediments and their implications on concurrent ADCP response – Case studies of the Portuguese inner shelf. *Marine Geology* 419 https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.106079

On the importance of sustained glider observations to study the ocean dynamics

L. Lamas (1), I. Martins (1), J. Vitorino (1), C. Barrera (2)

(1) Instituto Hidrográfico. Lisboa, Portugal. luisa.lamas@hidrografico.pt

(2) Oceanic Platform of the Canary Islands – PLOCAN. Las Palmas. Spain

Abstract: In recent years, Instituto Hidrográfico (IH) has been collaborating with PLOCAN to establish sustained glider observations across the Eastern North Atlantic. The present study shows an example of an integrated ocean observational approach to reproduce a comprehensive picture of the marine environment, using data collected by an underwater glider in two deployments (2019 and 2020) between Portugal and the Canary Islands, in combination with satellite and Argo data. The characterization of the physical parameters of the water column in the study domain is clearly relevant, particularly due to the uniqueness of the regional dynamics, provided by the presence of the Mediterranean Water and important subsurface structures, such as meddies, which were detected by the glider during both missions. Here, we show an example of how to exploit the advantages of combining data from different platforms in sustained observational programs, maximizing the capacities by each individual technology-component, to study the ocean dynamics.

Keywords: Eastern North Atlantic, in-situ observations, meddies, multiplatform observing-system, physical oceanography.

1. INTRODUCTION

The combined use of ocean data from multiple platforms is explored in this study, where observations are obtained from gliders, Argo floats and data from the Sentinel-3 satellites. All data analyzed here were collected concurrently with two glider missions (L2019 and L2020) carried out by IH and PLOCAN in a marine region offshore the west coast of continental Portugal to Madeira Island and the Canary Islands (Fig. 1).

The water column in the region of study is distinguished by the presence of the Mediterranean Water (MW), an intermediate water mass characterized by a strong salinity anomaly in the 600–1500 m depth range (Lozier *et al*., 1995, Fiúza *et al*., 1998). The presence of the MW, and the associated processes, confers a particular interest in exploring the water column dynamics in this region. The MW flows through the Strait of Gibraltar and spreads in the North Atlantic basin at intermediate levels, aided by the activity of submesoscale vortices, known as meddies (Pingree *et al*., 1993, Bower *et al*., 2002, Ambar *et al*., 2008). Instabilities of the Mediterranean undercurrent can occur in regions with steep bathymetry, such as submarine canyons and mounts, and are a forcing mechanism for meddies to form. Regions such as the Cape St. Vincent, the Gorringe Bank, and the Tagus Abyssal Plain (TAP) are common sites for the formation and retention of meddies (Pingree *et al*., 1993, Bower *et al*., 1997, Serra and Ambar, 2002, Batteen *et al*., 2007, Ambar *et al*., 2008, Aguiar *et al*., 2013)

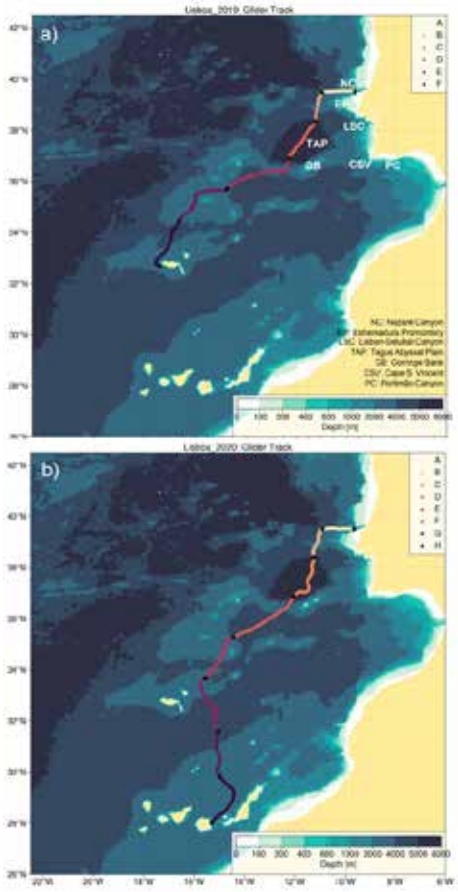


Fig. 1. General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) 2014 data over the area of study superimposed with the glider trajectory for missions L2019 (a) and L2020 (b). Some geographic features referred in this study are labeled in a). Synoptic sections are colored for reference.

Meddies have been described as rotating lens-like structures with typical diameters between 50 and 100

km, with vertical extents of about 700 m and a salty and warm core centered between 800 and 1400 m (Bower *et al*., 1997, Richardson *et al.,* 2002, Ambar *et al*., 2008). Meddies are often accompanied by an anticyclonic circulation at the sea surface (Pingree *et al*., 1993), which can be detected using satellite data (Oliveira *et al*., 2000, Bashmachnikov *et al*., 2014). In this study, special attention is given to the characterization of two meddies identified in the water column from glider temperature and salinity (TS) profiles and the possibility of combining data from different sources to explore the ocean dynamics around the meddies.

2. GLIDER DATA COLLECTION

An autonomous underwater Seaglider M1 collected ocean data during two missions, executed in 2019 and 2020. The L2019 mission occurred between 02 April 2019 and 12 June 2019, from the Nazaré Canyon to Madeira Island, covering a total of 1445 km. The L2020 mission was executed between 07 February and 05 May 2020, and the glider traveled from Nazaré Canyon to the Canary Islands, completing an extent of 1793 km. In both missions, the Seaglider M1 was equipped with a Glider payload Seabird Conductivity-Temperature Depth (CTD) sensor that measured temperature, conductivity and depth along a saw–tooth trajectory, between the surface and a maximum depth of 1000 m. The data were provided by PLOCAN and consists of 12 measurements per minute of latitude, longitude, time, temperature, salinity and pressure. Glider data was processed according to Lamas *et al*., 2021, and the final dataset consists of temperature, and salinity profiles with regular horizontal and vertical dimensions divided into synoptic sections according to time and geographic location, as referenced in Figure 1.

3. GLIDER DATA ANALYSIS

This study is focused on the analysis of section C, when the glider crossed the TAP since, in both missions, a meddy was detected at intermediate levels (Fig. 2 and Fig. 3). In L2019, the TS profiles show a distinct salinity and temperature anomaly located on the north side of the TAP (around the 50-km mark on Fig. 2) and centered at 800 m, depth range where, traditionally, meddies can be found. The anomalous warm and salty structure can be detected from 600 until 1000 m (which is the limit of the glider dive), and, at its core, is around 100 km wide. The center shows a maximum salinity value of 36.6, and a temperature of 13.2ºC. There is also a deflection of the density field connected with the meddy, causing the elevation of the isopycnals in the upper levels of the water column, reaching as far as the surface layers.

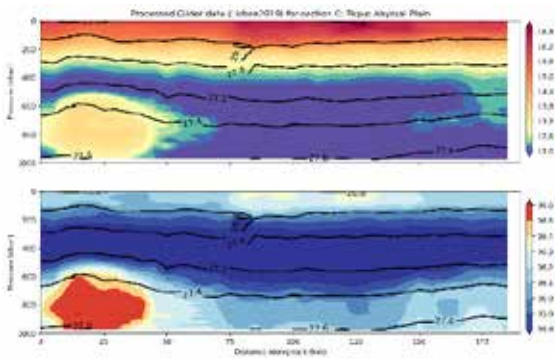


Fig. 2. Vertical profiles of temperature (top) and salinity (bottom) collected by the glider in section C (TAP) during L2019. Black solid lines represent the density anomaly (in kg:m-3). The zero marks the beginning of section C (11.20◦W, 38.53◦N)

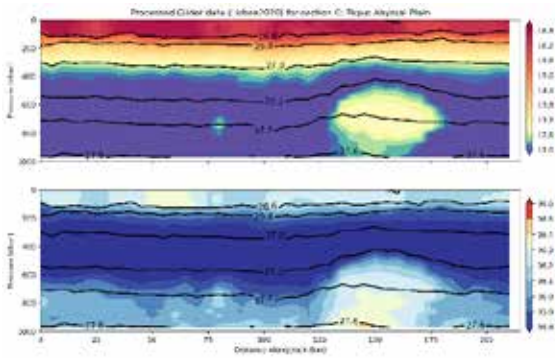


Fig. 3. Vertical profiles of temperature (top) and salinity (bottom) collected by the glider in section C (TAP) during L2020. Black solid lines represent the density anomaly (in kg:m−3). The zero marks the beginning of section C (11.25◦W, 38.35◦N).

Throughout section C, it is visible that the salinity increases after 600 m, which indicates the presence of the MW, but salinity values do not reach the maximum found at the core of the meddy, suggesting that the meddy was formed somewhere else and transported to this location. In the TS profiles collected during L2020 mission, a meddy is detectable in the south limit of section C (centered on the 155-km mark in Fig. 3). The core is not as salty nor as warm as the meddy captured in 2019, with a maximum of 36.2 and 13 ºC, centered at 750-m depth. The isopycnals show a deflection above the meddy, but at the surface, the deflection is not as clear as in the L2019 mission.

4. PERSPECTIVES ON MULTIPLATFORM DATA SYNERGY

4.1. ARGO data

Data from two Argo floats that crossed the TAP during missions L2019 and L2020 were analyzed. Argo float 6901260 performed 16 profiles in the same time as mission L2019 drifting along the western side of the TAP, and float 6901264 executed 17 profiles around the TAP during the L2020 mission.

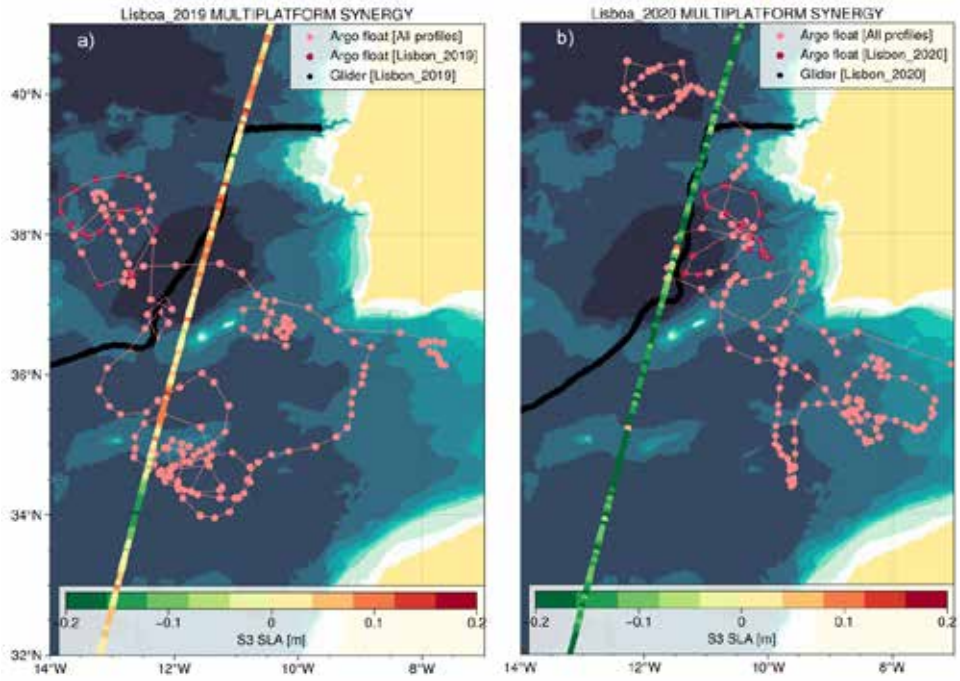


Fig. 4. GEBCO 2014 data over the area of study superimposed with glider trajectory, Argo floats profile locations and S3 SLA data, during missions L2019 (a) and L2020 (b).

Both floats are currently inactive but during their lifetime, they sampled the water column in the area of study (Fig. 4), crossing important topographic features in addition to the TAP, such as the Cape S. Vincent, Gorringe Bank and the Estremadura Promontory, regions of significant importance in the dynamics associated with MW.

Figure 5 shows the vertical salinity profiles retrieved by the two Argo floats mentioned above. The vertical profiles obtained by float 6901260 during L2019 and by float 6901264 during L2020 show a clear signature of the warm and salty MW at intermediate water depths (800–1500 m). However, it is not trivial to identify meddies by analyzing individual profiles alone, since the Argo floats are drifting platforms, and as such may be forced to drift with the meddy. On the one hand this will make it more difficult to detect the meddy individually, but on the other hand, it will allow the trajectory data to be used not only to detect the presence of a meddy but also to investigate important dynamics related with the meddy, such as processes associated with formation, displacement and retention.

4.2. Sentinel-3 data

Level-2 Sentinel 3 (S3) data is made available by the European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) and was used to explore the possibilities of combining glider and satellite data. One S3 track crossed close by the glider transect over sections B and C (Estremadura Promontory and TAP, respectively) in both missions (Fig. 4), on days 23 April 2019 and 14 February 2020. S3 altimetry data include sea level anomaly (SLA) values with an along-track resolution of 300 m, and which, due to its higher resolution, may enable the detection of smaller-scale features associated with submesoscale processes. S3 data also include products of Sea Surface Temperature and Ocean Colour, at 1 km and 300 m horizontal resolution covering a horizontal extent of 1400 km and 1270 km, respectively. Unfortunately, cloudy conditions on the two selected dates prevented the use of these products in the analysis, but the possibility to use these data in future missions is encouraging.

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Analysis of glider data collected in two missions along the Eastern North Atlantic allowed the identification of a meddy in the Tagus Abyssal Plain, which is a location where meddies are often detected (Serra and Ambar, 2002, Aguiar *et al*., 2013). Both meddies had a horizontal dimension in the order of 100 km, with a maximum of salinity centered between 700 and 800 m depth, which matches the typical meddy descriptions reported in literature (Richardson *et al*., 2000). Lamas *et al*., 2021 showed that, at the location of the meddy, there is an anticyclonic circulation and increase of SLA of approximately 5 cm, which is consistent with previous works (Pingree *et al*., 1993, Oliveira *et al*., 2000, Bashmachnikov *et al*., 2014). Future work will include the analysis of S3 altimetry data, to investigate lower-scale surface signals associated with the meddy.

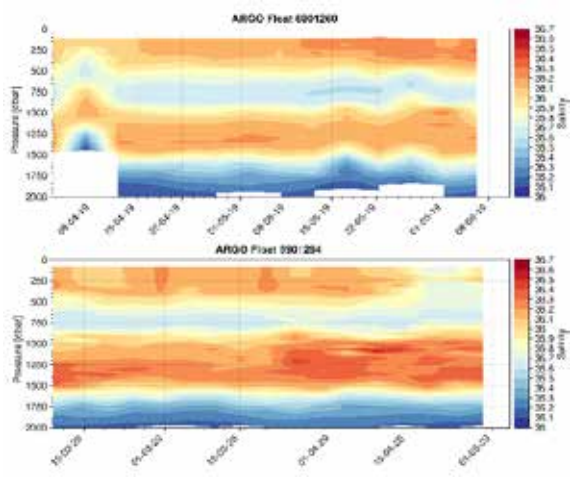


Fig. 5. Vertical salinity profiles of executed by Argo float 6901260 (top) during mission L2019 and by Argo float 6901264 (bottom) during mission L2020

Measuring the physical parameters of the water column is particularly relevant in the study domain because of the uniqueness of the local dynamics associated with the presence of the MW and affected by the steep topographic features present in the area, which can cause the formation, deflection and displacement of important subsurface structures, such as meddies. Satellite data can cover a large spatial area with relatively high temporal frequency, but its ability to capture subsurface dynamics is limited. Argo and Glider data are valuable platforms that provide information over the water column, which is essential to characterize the dynamics associated with the MW. Argo floats can cover a large area during long periods but are limited to their drifting dynamics. On the other hand, gliders provide unique capabilities and advantages for ocean observation in respect to efficiency and sustainability when compared to ship-based technologies from the operational point of view. Sustained glider missions in terms of endurance lines like the ones presented here become key in order to undertake further research on the consistency and variability of the dynamics explored in this study.

It is recognized that combining data from multiple sources enables the sustainability of observational programs, by maximizing the capacities of each individual platform to characterize ocean dynamical features, especially in a region where subsurface multi-scale dynamics are relevant.

Aknowledgments

Seaglider data was collected within the IFADO project (Interreg Atlantic - EAPA 165/2016). Sentinel 3 marine data are made available by EUMETSAT. Argo data were collected and made freely available by the International Argo Program. We acknowledge crew members of NRP Andromeda, who contributed to the deployment and successful glider data collection.

REFERENCES

Aguiar, A. B., A. Peliz, and X. Carton (2013). "A census of Meddies in a long-term high-resolution simulation", *Progress in Oceanography*, 116, 80-94.

Ambar, I., N. Serra, F. Neves, and T. Ferreira (2008). "Observations of the Mediterranean Undercurrent and eddies in the Gulf of Cadiz during 2001", *Journal of Marine Systems*, 71, 195-220.

Batteen, M. L., A. S. Martinho, H. A. Miller, and J. L. McClean (2007). "A process-oriented modelling study of the coastal Canary and Iberian Current system", *Ocean Modelling*, 18, 1–36.

Bashmachnikov, I., X. Carton, and T. V. Belonenko (2014). "Characteristics of surface signatures of Mediterranean water eddies", *Journal of Geophysical Research - Oceans,* 119, 7245-7266

Bower, A., L. Armi, L., and I. Ambar (1997), "Lagrangian observations of meddy formation during a Mediterranean undercurrent seeding experiment", Journal of Physical Oceanography, 27, 2445-2575

Bower, A., N. Serra, and I. Ambar (2002). "Structure of the Mediterranean undercurrent and Mediterranean water spreading around the southwestern Iberian Peninsula", Journal of Geophysical Research, 107, C10, 316.

Fiúza A. F.G, M. Hamann, I. Ambar, G. D. del Rio, N. Gonzalez and J. M. Cabanas (1998). "Water masses and their circulation off western Iberia during May 1993", Deep–Sea Research I, 45, 1127-1160

Lamas L. I. Martins, J. Vitorino and C. Barrera (2012). "Ocean dynamics characterization from a multiplatform observing-system approach in the East Central North Atlantic". *OCEANS 2021*: San Diego – Porto, 2021, 1-7.

Lozier, M. S., W. B. Owens, and R. G. Curry (1995). "The climatology of the North Atlantic", Progress in Oceanography, 36, 1-44.

Oliveira, P.B., N. Serra, A. Fiuza, and I. Ambar (2000). "A study of meddies using simultaneous in-situ and satellite observations", *Satellites, Oceanography and Society*. Elsevier Science. 125-148.

Pingree, R., and B. Le Cann (1993). "A shallow meddy (a Smeddy) from the secondary mediterranean salinity maximum", *Journal of Geophysical Research,* 98(C11), 20169-20185

Richardson, P. L., A. S. Bower, and W. Zenk (2000). "A census of Meddies tracked by floats", *Progress in Oceanography*, 45(2), 209-250.

Serra, N., and I. Ambar (2002). "Eddy generation in the Mediterranean Undercurrent", *Deep-Sea Research Part II*, 49, 4225-4243.

Towards a validation service of Sentinel-3 data using in-situ data collected by the MONIZEE system

L. Lamas (1), I. Martins (1), R. Esteves (1), P. Nunes (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Lisboa. luisa.lamas@hidrografico.pt

Abstract: As a new member of the Sentinel-3 Validation Team (S3VT), Instituto Hidrográfico (IH) proposes to address the regional validation of the sea surface temperature (SST) products from Sentinel 3 (S3) satellites, for oceanic and coastal waters off Portugal, using in-situ data. Consistent in-situ SST measurements off Portugal can be acquired through independent sources, such as moored buoys from the MONIZEE system, sensors onboard research vessels and surface drifters developed within the MELOA project. Since these data are not used in the calibration procedure of S3, they provide a unique and independent validation source. This article intends to describe the ongoing work as S3VT members, namely the statistical analysis between S3 SST data and historical in-situ data, as well as to present an overview of the operational monitoring service of a systematic inter-comparison between S3 and in-situ data, to be implemented at Hidrografico+.

Keywords: in-situ observations, quality assessment, sea surface temperature, Sentinel-3 Validation Team, statistical analysis.

1. INTRODUCTION

The Sentinel 3 Validation Team (S3VT) was created by the European Space Agency (ESA) and by the European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) to provide feedback and recommendations to progress with the evolution and improvement of the Sentinel-3 (S3) core data products. The S3VT consists of scientists with recognized expertise in the types of measurements provided by S3, namely products of sea surface temperature (SST), ocean colour and altimetry.

Instituto Hidrográfico (IH) was accepted as a S3VT member in February 2022 with the project entitled "Sentinel-3 SLSTR validation using in-situ data collected by the MONIZEE system (Portugal)", which intends to contribute to the independent and systematic validation of S3 Level-2 SST products. To this purpose, consistent time series of in-situ SST on the Eastern North Atlantic, where in general in-situ data is still sparse and sporadic, will be used to perform the validation of Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR) Level-2 Water Single Temperature (WST) product.

In-situ SST measurements at oceanic and coastal waters off Portugal can be acquired through three independent sources:

i) moored buoys from the MONIZEE system, consisting of 4 coastal and 4 oceanic buoys along the Portugal mainland marine waters, 6 coastal buoys from the Azores network and 2 coastal buoys from Madeira (Fig. 1);

ii) Sub-surface SST data (>3m), collected throughout opportunistic hydrographic vessel missions along the Portuguese Economic Exclusive Zone (EEZ);

iii) SST data collected from surface drifters, namely the new WAVY drifters developed within the MELOA project.

These in-situ data is not used in the calibration of S3 products thus providing a unique and independent validation procedure.

The Portuguese mainland EEZ is part of the Iberian Peninsula located in the Eastern North Atlantic border, and is characterized by a dynamic system dominated by seasonal upwelling regimes associated with the north Atlantic anticyclonic gyre, and a combination of different water masses and currents (Fiuza *et al.,* 1982, Relvas *et al.,* 2007). The Azores archipelago waters, located in the middle of the North Atlantic, are characterized by a complex current system that causes strong horizontal temperature gradients (Bashmachnikov *et al*., 2004). On the other hand, the Madeira archipelago waters, bordering the Morocco waters, are considered more stable and warmer along the year, but local wakes of warmer waters induced by northeasterly trade winds are often observed (Caldeira *et al.,* 2002). These three regions, extending from subtropical to mid-latitudes, compose the region of interest and justify that particular attention should be given to the Portuguese EEZ. Moreover, MONIZEE comprises not only coastal buoys along these three regions but also oceanic buoys over the Portuguese mainland, thus providing a unique opportunity to assess the S3 product's quality in different oceanic and coastal conditions.

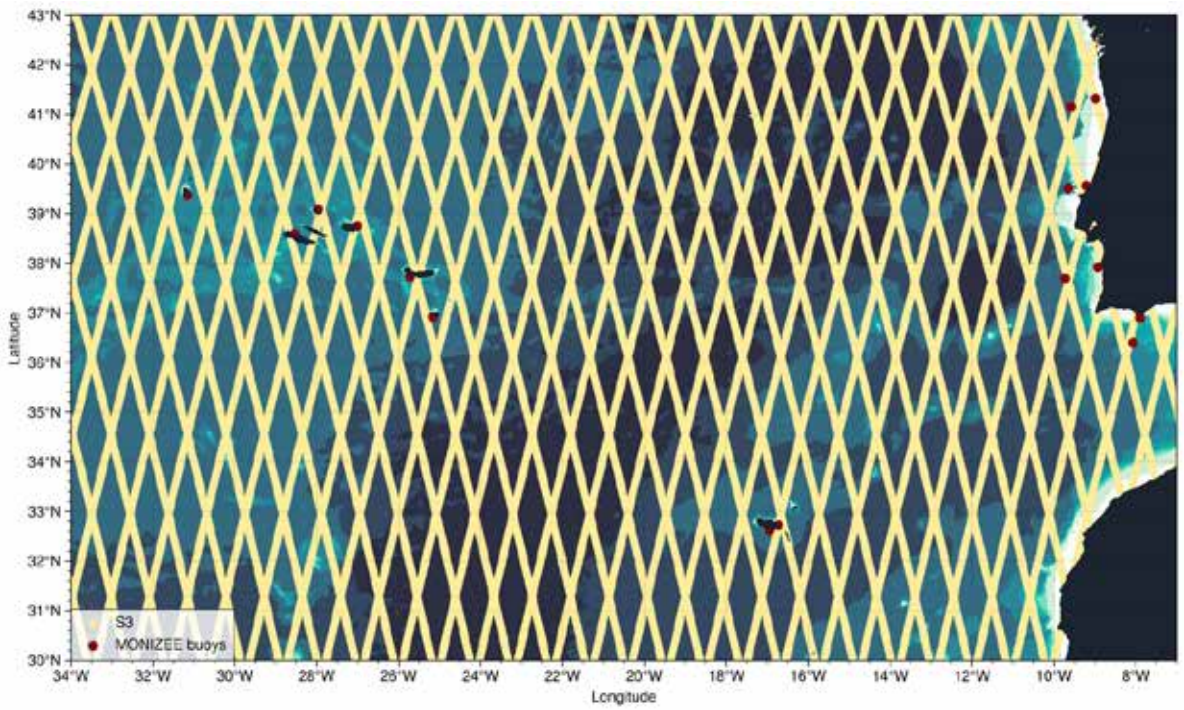


Fig. 1. MONIZEE buoy network (marked as red circles) and S3 tracks (yellow) for one complete cycle of S3A and S3B satellites, covering the region of study (Portugal Mainland, Azores and Madeira Archipelagos)

2. MONIZEE Buoy Network

The MONIZEE buoy network consists of 16 buoys operated by IH, the University of Azores, the Observatory for the Environment of the Azores and the Ports Administration of the Madeira Autonomous Region. Most of these buoys collect SST data since the beginning of Sentinel 3 mission, thus providing a consistent time series that will result in 5+ years of match-up data, spatially distributed across the Eastern North Atlantic (Fig. 1), in an area of relatively scarce in situ data.

The MONIZEE buoy network encompasses two types of buoys: Meteo-oceanographic Fugro-Oceanor Wavescan and Datawell Waverider. Both types are equipped with a trans-receiver GPS (Global Positioning System). The Wavescan buoys, equipped with Aanderaa 4050 or 4060 temperature sensors, measure SST at approximately 1 m depth and ensure real-time access to the data through its IRIDIUM satellite communication system. The Waveriders are equipped with internal temperature sensors located at 0.7 m depth and have a HF link communication system installed.

The Datawell Waverider SST data are acquired at a sample rate of 30 minutes, whereas the Oceanor Wavescan data were acquired at a sample rate of 1 hour. Upon reception, data follows a validation procedure at the contributing institutions, the IH, the UAC and the APRAM, process after which data are loaded into transactional local databases.

Besides data from the MONIZEE buoy network, SST data from CTDs onboard IH's hydrographic vessels or others, may be collected in an opportunity basis, during IH's recurrent sea-going missions along the Portuguese EEZ. Surface drifters such as the WAVY Ocean drifters, which are loaded with two thermistors, are also available to be deployed in specific oceanic missions, thus providing another source of in-situ validation.

3. SENTINEL-3

Sentinel-3 mission consists of two identical satellites (A and B) with +/- 140º out of phase orbit which enable a short revisit time of less than one day for SLSTR at the equator. The S3 orbit is a near-polar sun-synchronous orbit with an orbit cycle of 27 days and a reference altitude of 814.5 km (Fig. 1).

The Sentinel-3 satellites carry a set of payload instruments, namely an imaging spectrometer instrument called the Ocean and Land Colour Instrument (OLCI); a dual view imaging radiometer instrument (SLSTR) and a dual-frequency SAR altimeter called the SAR Radar ALtimeter (SRAL) instrument.

SLSTR comprises a nadir view swath of 1400 km and an oblique view swath of 740 km. The orbit specifications and dual view swath allows for a revisit time of 1.9 days at the equator with one single satellite and 0.9 days with the A and B constellation.

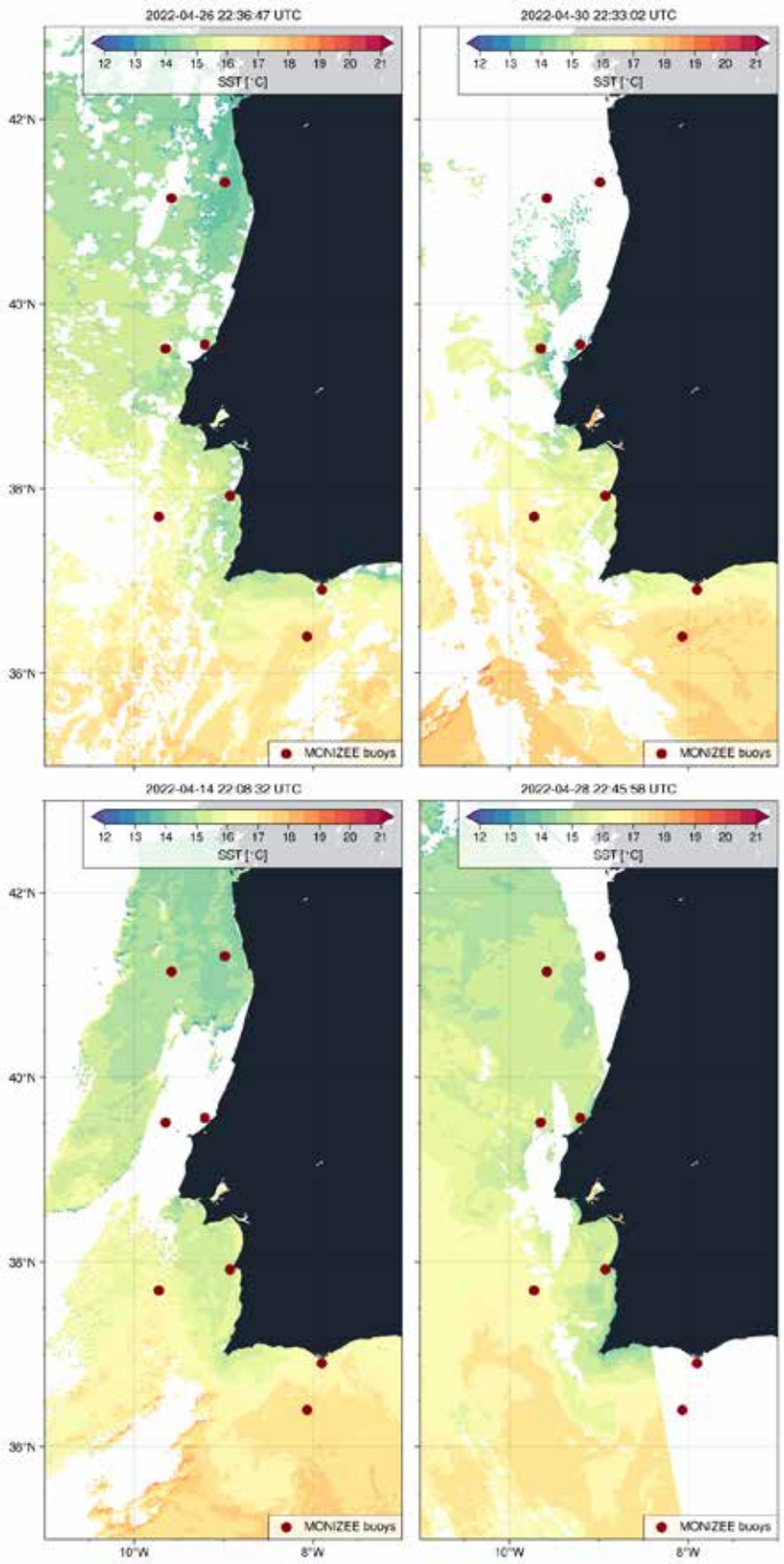


Fig. 2. Near-real time S3 L2 SST over the Portuguese mainland waters, in 4 different days of April 2022. The coastal and oceanic buoys locations is marked as red circles.

Using both satellites, the revisit time reduces to less than 0.8 days, for latitudes higher than 30º. Level 2 product of S3 consists of geophysical quantities derived specifically for marine and land application domains. The timeframe for delivery of products is dependent on the specific application: Near Real-Time (NRT) products are delivered to users in less than 3-hours after acquisition, Non-Time Critical (NRT) products are delivered typically within 24 or 48 hours.

SLSTR Level-2 WST (Water Single Temperature) L2P product includes SST values following the Group for High Resolution Sea Surface Temperature (GHRSST) specifications, at 1 km resolution (Fig. 2). SLSTR Level-1 and 2 products are delivered in free-standing NetCDF 4 product files and made available by EUMETSAT (S3IPF.PDS.005.2).

The proposed activity aims to contribute to the S3 validation plan as it will provide independent validation evidence of SLSTR Level-2 WST products using in-situ data from moored buoys, which complies with the S3-PL-ESA-SY-0265, contributing to the task "SST Product validation".

4. METHODOLOGY

A large database of SST match-ups along the Portuguese EEZ will be used to perform the validation of the 1km S3 L2P SST measurements. S3 Level-2P SST data will be extracted matching the space-time reference of the available in-situ data. Different protocols will be defined, applied and tested to retrieve the SST value from the S3 product, with the purpose to analyze the sensitivity of the product to different match-up techniques (e.g.: nearest neighbor and median).

The match-up database will then be used to perform the statistical analysis between both systems and to assess the accuracy and precision of S3 SST product. The results will be analyzed for oceanic and coastal waters in the Portuguese EEZ, and with respect to different wind and wave conditions.

After the historical validation of the product, daily monitoring of S3 SST data using moored buoys SST data will be implemented within the Hidrografico+ infrastructure (https://geomar.hidrografico.pt/)

5. EXPECTED OUTCOMES

IH, as a S3VT member, is expected to contribute to the independent validation of Sentinel 3 SST data products. The expected outcomes from this activity are a statistical comparison between in-situ and S3 SST data and the historical assessment of the accuracy and precision of SLSTR Level-2 WST product for the coastal and oceanic waters off Portugal. Moreover IH purposes to implement a systematic comparison service between S3 SST and in-situ data obtained by the MONIZZE system, on the Portuguese EEZ.

6. CONCLUSIONS

Being part of the S3VT will strengthen IH's role as in-situ data provider for validation of satellite-derived products. It will also promote scientific collaboration and engagement between other S3VT members regarding validation and processing techniques.

IH intends to contribute to the S3VT with its expertise in in-situ data collection and analysis, and will provide an estimate of S3 SST accuracy and precision, as well as operational monitoring of the S3 SST products in the oceanic and coastal regions of the Portuguese EEZ.

Acknowledgements

This work is being developed under project id 69163 entitled “Sentinel 3 SLSTR validation using in-situ data collected by the MONIZEE system (Portugal)”. Buoy’s data are managed and processed by the Division of Oceanography from Instituto Hidrográfico 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. Sentinel 3 marine data are made available by EUMETSAT.

REFERENCES

Bashmachnikov, I., V. Lafon and 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.

Caldeira, R. M. A., S. Groom, P. Miller, D. Pilgrim, and N. P. Nezlin (2002) Sea-surface signatures of the island mass effect phenomena around Madeira Island, Northeast Atlantic. *Remote Sensing of Environment*, 80, 336–360.

Fiuza, A., Macedo M. and Guerreiro, M. (1982). Climatological space and time variation of the Portuguese coastal upwelling. *Oceanologica*, Acta 5, 31–40.

Relvas P., E.D. Barton, J. Dubert, P.B. Oliveira, A. Peliz, J.C.B. da Silva and A.M.P. Santos (2007). Physical oceanography of the western Iberia ecosystem: Latest views and challenges. *Progress in Oceanography*, 74, 149-173.

S3-PL-ESA-SY-0265 (2014) Sentinel-3 Calibration and Validation Plan.

S3IPF.PDS.005.2 (2020) Sentinel-3 SLSTR Product Data Format Specification - Level 2 Land products.

Environmental drivers of phytoplankton in the coast of Portugal

J. P. C. Cruz (1), A. Tracana (1), L. Favareto (1), A. Ferreira (1), C. Palma (2), C. Borges (2), J. Heumüller (1), A. C. Brito (1)

(1) MARE - Marine and Environmental Sciences Centre. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal

(2) IH - Instituto Hidrográfico. Rua das Trinas 49, 1200-677 Lisboa, Portugal

Abstract: Portugal's vast coast has great socioeconomic potential, characterized by high hydrodynamic and geomorphologic diversity. The growth of phytoplankton, the base of the marine food chain, is shaped by environmental characteristics. The goal was to evaluate the main drivers of phytoplankton dynamics and identify coastal areas with high biomass. Four sampling campaigns (2018-2020) covering most of the Portuguese coast were performed: A) Porto-Viana do Castelo; B) Aveiro-Figueira da Foz; C) Peniche; D) Setúbal-Sines; and E) Algarve coast. Samples were collected for the analysis of phytoplankton pigments through HPLC-CHEMTAX. Environmental parameters were assessed to understand their importance in shaping phytoplankton communities. High seasonal variation of phytoplankton biomass along the coast was observed, with the highest chlorophyll *a* during spring and lowest during autumn. Three phytoplankton biomass hotspots, located in areas A, C and E were identified. In general, Bacillariophyceae dominated the communities. Colder, oxygen rich and turbid waters yielded the highest productivity.

Palavras-chave: Atlantic coastal waters, environmental drivers, HPLC-CHEMTAX, phytoplankton biomass hotspots, phytoplankton communities.

1. INTRODUCTION

Portugal has a long and diverse coast. The coastline is interleaved with cliffs and low rocky and sandy shores (Ferreira, et. al, 2008). Meanwhile, the continental shelf has deep canyons, such as the Nazaré canyon, and the coast is part of the upwelling system associated with the North Atlantic anti-cyclone gyre (Nave et al., 2019). This diversity creates a great potential for multiple socioeconomic usages, ranging from aquaculture to tourism.

Many maritime activities depend on phytoplankton since it is the base of the marine food web (Goela et al., 2014). Environmental characteristics such as temperature, salinity, light, nutrient availability, stratification and currents can have a great effect on the temporal and spatial phytoplankton distribution. Areas with high phytoplankton biomass are of great interest for fisheries as well as for aquaculture instalments, since they serve as an important food source for both (Goela et al., 2014), and may indicate the existence of areas with lower maintenance costs for aquaculture production.

The objective of this study was to assess the role of environmental drivers on the distribution of phytoplankton and to contribute to aquaculture site selection.

2. METHODS

2.1. Sampling

Four sampling campaigns were carried along the coast of continental Portugal, within the scope of the AQUIMAR project (https://aquimar.hidrografico.pt/). These campaigns took place in autumn 2018 and 2019 (campaign 1 and 3, respectively) and in spring 2019 and 2020 (campaign 2 and 4, respectively). Five areas were studied: 1) A (Viana do Castelo–Porto); 2). B (Aveiro–Figueira da Foz); 3) C (Peniche–Santa Cruz); 4) D (Setúbal–Sines); 5) E (Sagres–Tavira). In each campaign, surface water samples were collected for HPLC-CHEMTAX analysis (Mendes et al., 2007), which allows the quantification and identification of phytoplankton biomass and groups. Samples were collected for nutrient analysis (Mosqueira et al., 2022) turbidity, dissolved oxygen, and pH, and, using a multiparametric probe, salinity, temperature, values were recorded.

2.2. Data Analysis

2.2.1. HPLC-CHEMTAX

The relative and absolute abundance of the phytoplankton taxonomic groups that contribute to the total Chlorophyll *a* concentrations (Chl*a*) was calculated from the concentration of pigments using the CHEMTAX program (version 1.95, Mackey et al. (1996)). For the CHEMTAX-HPLC analysis, an input matrix was optimized for all study areas/sampling campaigns, to maintain comparability. The groups (Fig. 3) were introduced considering the diagnostic pigments detected in the HPLC analysis. The pigment/Chl*a* ratios entered in

the input matrix were selected from Gibb et al. (2001); Mendes et al. (2011); Roy et al. (2011). The output matrices were obtained using the approach proposed by Wright et al., (2009). To minimize error propagation due to the variability of pigment/Chl*a* ratios caused by seasonality and sampling site, the data were divided by sampling site and campaign

2.2.2. Statistical analyses

Multivariate analyses were performed using PRIMER-E (version 6.1.13) with PERMANOVA (version 1.0.3) add-on software (Anderson et al. (2008), Clarke & Gorley (2006)) to analyse spatio-temporal community composition and identify environmental drivers.

A Principal Coordinates Analysis (PCO) was used to visualize patterns of the phytoplankton community composition (Anderson et al., 2008) and the relationship between the environmental variables and phytoplankton community. To highlight the most correlated drivers and groups with the spatio-temporal differences observed the Spearman correlation was performed. All statistical tests were carried out at a level of $\alpha = 0.05$.

3. RESULTS

Overall, higher Chl*a* were recorded during spring. During the spring of 2019, areas A, with the highest Chl*a* of up to 14.39 μgl^{-1}, and E presented the highest values, while during the spring 2020 higher values were recorded in areas C and D. Meanwhile, the lowest Chl*a* were recorded in area E during autumn of both 2018 and 2019 (as low as 0.08 μgl^{-1}). In area A during most campaigns, higher Chl*a* were recorded near the coast close to the estuary of the Douro River, except for campaign 4 where higher values were observed in more offshore regions. In area B, Chl*a* were similar between sampling campaigns and consistently low, with some higher values close to the coast and in the more northern part, close to the Ria de Aveiro lagoon, especially during the spring of 2019. In area C Chl*a* were also homogeneous between campaigns, except for the 2020 spring when Chl*a* doubled. In area D, a similar pattern to area C was observed, but instead higher Chl*a* were observed near the coast and, especially during the 2020 spring, south of Sines. In area E, Chl*a* decreased with increased distance to the shore, with higher values recorded near the Ria Formosa Lagoon and Cape São Vicente during spring 2019 and between these during spring 2020.

As it can be seen in the PCO (Fig. 2) of the community composition with the environmental variables (data not shown, only used in PCO analysis) turbidity was the main driver associated to the campaigns with the highest Chl*a*, for all areas.

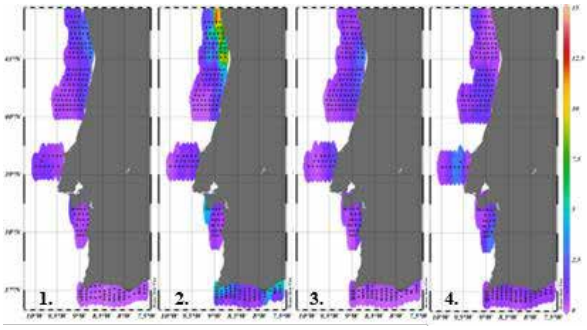


Fig. 1 - Chla data by campaigns. 1. autumn 2018; 2. spring 2019; 3. autumn 2019; 4. spring 2020.

In areas A and B, higher values of dissolved oxygen also were associated to the campaigns with higher Chl*a* (campaign 2). While in areas A and B, higher values of NH3 were associated to campaigns with higher Chl*a*, in areas C and D it was the opposite, being associated to campaigns with lower Chl*a*. Conductivity, temperature and occasionally pH were associated to campaigns where the biomass (*i.e.,* Chl*a*) was lower.

The HPLC-CHEMTAX indicated that spring phytoplankton communities were dominated by a single (mainly, Bacillariophyceae) or few groups, while autumn communities tended to be dominated by multiple groups. In area A, in addition to Bacillariophyceae, Dinophyta and Euglenophyceae dominated the community. In area B, during autumn, Bacillariophyceae contribution fell below 20% and other groups became of increased importance, among them were Dinophyta, Euglenophyceae, Cryptophyceae and Cyanobacteria. In area C a similar pattern was observed as all groups contributed to various degrees, up to 40%, to the community during autumn months while during spring months Bacillariophyceae dominate. In area D, during most of the campaigns, communities were not dominated by Bacillariophyceae, but Dinophyta, Euglenophyceae and Prymnesiophyceae were major contributors. In area E, the community was more stable with Bacillariophyceae, Dinophyta and Euglenoohyceae consistently contributing largely to the community, with Cyanobacteria only playing a more relevant role occasionally (Fig. 3).

4. DISCUSSION

A high phytoplankton biomass is of great benefit for aquaculture instalments, especially for bivalves. since most fish reared in aquacultures do not feed on phytoplankton but depend on added feed, as it reduces maintenance costs, mainly because the reared species require less feed (Mosqueira et al., 2022). Three major areas with high Chl*a*, which is the main proxy for phytoplankton biomass, were identified in the present study. These areas were, along the most northern coast until the Aveiro region (area A), the region near to the Estremadura (area C) and the coastal region of the Algarve (area E). The

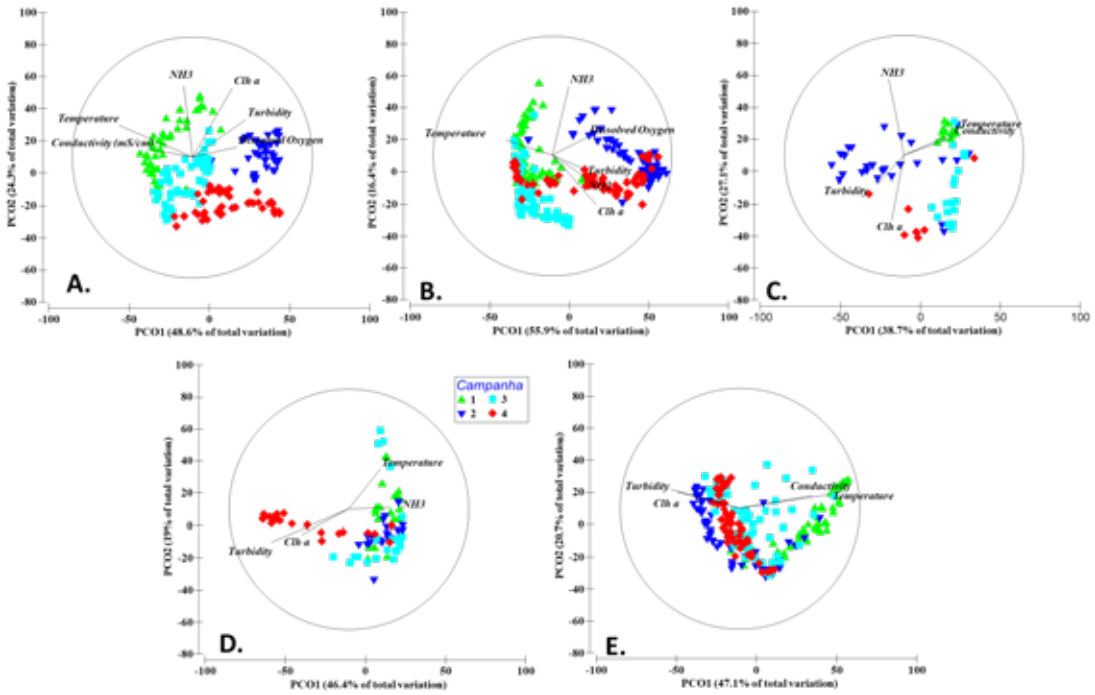


Fig. 2 - PCO of the phytoplankton communities with the environmental parameters correlated (Pearson Correlation > 0.3) to the community composition for each sampling campaign (1-4)

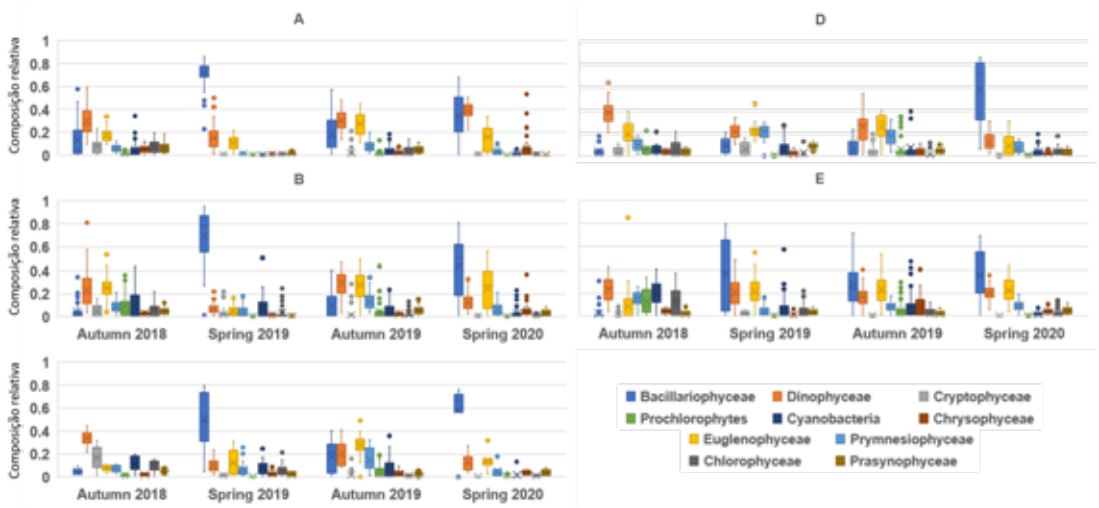


Fig. 3 - Box-plot showing the distribution of the relative abundance for each studied phytoplankton group in each area and each campaign.

first two areas are in agreement with the study of Ferreira et al. (2019), as being of high productivity. The main factors associated to phytoplankton productivity identified were high turbidity, linked with increased continental run-off and hydrodynamism (Seers and Shears, 2015), and higher nutrient load, especially ammonia, which may suggest a limiting role of nutrients. Instead, higher temperatures, especially during the autumn, were associated with lower Chl*a*. Seasonality also plays an important role with higher Chl*a* during the spring. The Portuguese coast is characterized by an upwelling system that has a typical seasonal pattern, with southerly winds between October and March that promote downwelling near the coast, and northerly winds mainly during the summer, promoting coastal upwelling (Nave et al., 2019). Upwelling is particularly strong in the northern coast, presenting usually cooler, nutrient rich waters, associated with higher phytoplankton biomass (Nave et al., 2019).

Bacillariophyceae were the most dominant phytoplankton group, followed by Dinophyta and Euglenophyceae. Chl*a* had the highest values when these three groups dominated, indicating that they are largely contributing to phytoplankton biomass.

The identification of these high phytoplankton biomass areas will help in the identification of priority areas for the instalment of aquaculture and ultimately in a more effective marine spatial

planning along the Portuguese coast. Furthermore, the identification of these areas sets a cornerstone for future studies concerning phytoplankton communities and the broader dynamic of the Portuguese coastal communities.

5. CONCLUSION

In this study, it was possible to identify three phytoplankton hotspots along the Portuguese continental coast, with turbidity and nutrient availability being associated with higher Chl*a* in these areas, especially during the spring season. The phytoplankton communities of these regions, especially during high biomass periods were dominated by Bacillariophyceae, Dinophyta and Euglenophyceae.

Acknowledgements

This study had the financial support of Operational Programme MAR2020 through the project MAR–02.01.01–FEAMP-0107 "AQUIMAR - Marine knowledge supporting aquaculture". L.Favareto received support from National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) Brazil (200589/2019-9).

REFERÊNCIAS

Anderson, M.J., Gorley, R.N. and Clarke, K.R., 2008. *PERMANOVA+ for PRIMER: Guide to Software and Statistical Methods*. *PRIMER-E*. Plymouth, UK.

Clarke, K.R. and Gorley, R.N., 2006. Plymouth routines in multivariate ecological research. PRIMER v6: Use manual/Tutorial. *PRIMER-E:Plymouth*, p.190.

Ferreira, A., Garrido-Amador, P. and Brito, A.C., 2019. Disentangling Environmental Drivers of Phytoplankton Biomass off Western Iberia. *Frontiers in Marine Science*, [online] 6(FEB), pp.1–17. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00044.

Ferreira, Ó., Dias, J.A. and Taborda, R., 2008. Implications of sea-level rise for continental portugal. *Journal of Coastal Research*, 24(2), pp.317–324. https://doi.org/10.2112/07A-0006.1.

Gibb, S.W., Cummings, D.G., Irigoien, X., Barlow, R.G., Fauzi, R. and Mantoura, C., 2001. Phytoplankton pigment chemotaxonomy of the northeastern Atlantic. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 48(4–5), pp.795–823. https://doi.org/10.1016/S0967-0645(00)00098-9.

Goela, P.C., Danchenko, S., Icely, J.D., Lubian, L.M., Cristina, S. and Newton, A., 2014. Using CHEMTAX to evaluate seasonal and interannual dynamics of the phytoplankton community off the South-west coast of Portugal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, [online] 151, pp.112–123. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.10.001.

Mackey, M., Mackey, D., Higgins, H. and Wright, S., 1996. CHEMTAX - a program for estimating class abundances from chemical markers:application to HPLC measurements of phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 144(5), pp.265–283. https://doi.org/10.3354/meps144265.

Mendes, C.R., Cartaxana, P. and Brotas, V., 2007. HPLC determination of phytoplankton and microphytobenthos pigments: comparing resolution and sensitivity of a C 18 and a C 8 method. *Limnology and Oceanography: Methods*, [online] 5(10), pp.363–370. https://doi.org/10.4319/lom.2007.5.363.

Mendes, C.R., Sá, C., Vitorino, J., Borges, C., Tavano Garcia, V.M. and Brotas, V., 2011. Spatial distribution of phytoplankton assemblages in the Nazaré submarine canyon region (Portugal): HPLC-CHEMTAX approach. *Journal of Marine Systems*, [online] 87(1), pp.90–101. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.03.005.

Mosqueira, M., Pombo, A., Borges, C., Brito, A.C., Zacarias, N., Esteves, R. and Palma, C., 2022. Potential for Coastal and Offshore Aquaculture in Portugal: Insights from Physico-Chemical and Oceanographic Conditions. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(5). https://doi.org/10.3390/app12052742.

Nave, S., Lebreiro, S., Michel, E., Kissel, C., Figueiredo, M.O., Guihou, A., Ferreira, A., Labeyrie, L. and Alberto, A., 2019. The Atlantic Meridional Overturning Circulation as productivity regulator of the North Atlantic Subtropical Gyre. *Quaternary Research (United States)*, 91(1), pp.399–413. https://doi.org/10.1017/qua.2018.88.

Roy, S., Llewellyn, C., Egeland, E.S. and Johnsen, G. eds., 2011. *Phytoplankton Pigments*. [online] Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511732263.

Seers, B.M. and Shears, N.T., 2015. Spatio-temporal patterns in coastal turbidity - Long-term trends and drivers of variation across an estuarine-open coast gradient. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, [online] 154(December 2014), pp.137–151. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.12.018.

Wright, S.W., Ishikawa, A., Marchant, H.J., Davidson, A.T., Van Den Enden, R.L. and Nash, G. V., 2009. Composition and significance of picophytoplankton in Antarctic waters. *Polar Biology*, 32(5), pp.797–808. https://doi.org/10.1007/s00300-009-0582-9

Teoria de valores extremos aplicada à caracterização da sobrelevação meteorológica no porto de Leixões

P. Rodrigues (1), D. Carinhas (2), C. Lemos (3)

(1) Escola Naval, Instituto Universitário Militar, pedromsrodrigues98gmail.com.

(2) Instituto Hidrográfico, IIFA/Universidade de Évora.

(3) CINAV, Escola Naval, Instituto Universitário Militar, Base Naval de Lisboa – Alfeite 2810-001, Almada.

Resumo: Nas últimas décadas, na costa portuguesa, as sobrelevações do nível do mar, de origem meteorológica e combinadas com a agitação marítima, são a causa de muitas inundações, cheias, assim como aumento dos níveis de erosão costeira. Neste trabalho, é apresentado um estudo dos valores extremos da sobrelevação da maré, definida como a diferença entre a maré observada e a astronómica prevista, recorrendo a duas famílias de distribuições conhecidas da Teoria dos Valores Extremos (TVE), a Generalizada de Valores Extremos e Generalizada de Pareto (GEV e GP, respetivamente), com o objetivo de determinar períodos de retorno associados aos níveis da sobrelevação. A teoria dos valores extremos foi aplicada à série de dados de alturas horárias no período de 31/12/1994 a 31/12/2020 proveniente da estação maregráfica de Leixões. Mantendo-se as condições atuais, é de esperar que os desvios não excedam 1m de altura até ao final do século.

Palavras-chave: desvio**,** distribuição generalizada de Pareto, distribuição generalizada de valores extremos, marés, nível médio do mar, séries temporais.

1. INTRODUÇÃO

A monitorização, estudo e conhecimento da maré é de grande interesse para a zona costeira de Portugal, nomeadamente para impedir o galgamento de ondas em portos.

A altura de água, X(t), observada num determinado local, pode ser representada por uma função com a forma seguinte:

$X(t) = Z_0(t) + T(t) + S(t)$, onde:
$Z_0(t)$ – nível médio do mar no ponto de observação;
T(t) – variação da maré astronómica;

S(t) – variação da altura da água devido a efeitos meteorológicos (desvios).

O movimento regular da maré é constantemente influenciado, a um menor ou maior grau, por efeitos meteorológicos. Em certas regiões do globo, inundações costeiras intensas podem-se verificar quando há a coincidência de fenómenos meteorológicos extremos, como tempestades tropicais ou tufões, com alturas de maré astronómica elevada. As condições meteorológicas são a principal causa de diferenças entre alturas de maré previstas e observadas, fazendo-se notar com maior intensidade nos períodos de Inverno (Pugh, 1987).

Através da monitorização e do estudo das marés e dos seus fenómenos extremos, é possível construir defesas, como os quebra-mares, com altura suficiente para que a probabilidade deste tipo de eventos terem impacto seja ínfima (Gomes *et al*., 2013).

O estudo dos valores extremos de variáveis aleatórias tem grande importância em muitos domínios, como sejam as alterações climáticas, a sismologia ou a engenharia oceanográfica, por serem os eventos extremos os que têm consequências graves ou mesmo catastróficas. Embora a estimativa de valores extremos seja um tópico mais difícil (e mesmo controverso) do que a estimativa de valores de tendência central e dispersão, é, ainda assim, de grande importância para a previsão de períodos de retorno de eventos suscetíveis de produzir grandes impactos (Guerreiro, 2015).

Num estudo de extremos de maré há a preocupação em dar resposta a questões como:

(i) Qual o maior desvio que ocorreu?
(ii) Qual período de retorno, estimado, destes valores extremos?
(iii) Que impacto terão estes valores extremos quando combinados com a maior maré astronómica prevista?
(iv) As estruturas portuárias estão dimensionadas para proteger o interior dos portos dos eventos extremos?

Este trabalho visa encontrar respostas para estas questões, tendo como caso de estudo o porto de Leixões no período de 2002 a 2020, através do ajustamento dos valores extremos das alturas horárias da maré

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O teorema de Fisher-Tippett-Gnedenko estabelece que o máximo da amostra devidamente normalizado

converge em distribuição para uma variável aleatória cuja distribuição será uma das identificadas por Tipo I, II e III (Gomes et al., 2013). Estas três famílias de distribuição são conhecidas pelas Distribuições de Valores Extremos. Em particular, a distribuição do Tipo I é chamada de Gumbel, a de Tipo II de Fréchet e a de Tipo III de Weibull (de máximos). Cada uma destas famílias de distribuição tem os seus parâmetros de localização (λ) e de escala (δ). As famílias de distribuições de Fréchet e Weibull têm um parâmetro de forma (α). Contudo, é possível trabalhar com uma família que abrange essas três possíveis famílias de distribuições limite. von Mises (1936) e Jenkinson (1955) (Gomes et al., 2013) unificaram as famílias Gumbel, Fréchet e Weibull na chamada distribuição Generalizada de Valores Extremos (Generalized Extreme Values - GEV) cuja expressão é a seguinte:

$$G_\gamma(x) = \begin{cases} \exp\left(-(1+\gamma x)^{-\frac{1}{\gamma}}\right), 1+\gamma x > 0, \gamma \neq 0 \\ \exp(-exp(-x)) \ , x \in IR, \gamma = 0 \end{cases}.$$

As famílias de distribuições de valores extremos Fréchet e Weibull correspondem, respetivamente, aos casos $\gamma > 0$ e $\gamma < 0$, na distribuição GEV. Quando $\gamma = 0$, a família GEV obtida é interpretada como o limite por continuidade quando $\gamma \to 0$, e que corresponde ao domínio de atração max-estável Gumbel. O parâmetro γ na distribuição GEV, como já foi indicado, é o parâmetro de forma e está diretamente relacionado com o peso da cauda direita da distribuição e, por esse motivo, também é denominado de índice de cauda.

Por vezes poderá ser mais útil analisar variáveis aleatórias que representem os excessos acima de um determinado nível extremo, chamado de threshold. As observações que excedem um dado threshold u são chamadas de excedências. Estas excedências têm um papel bastante importante em estudos de valores extremos. Para estas duas análises os dados da amostra em estudo, têm de ser aleatórios, independentes e identicamente distribuídos.

A distribuição Generalizada Pareto (GP) é uma aproximação para a distribuição dos excessos acima de um threshold elevado u.

A função de distribuição GP é dada por (Gomes et al., 2013):

$$H_\gamma(x|u,\sigma_u) = \begin{cases} 1-\left(1+\gamma\frac{x-u}{\sigma_u}\right)^{\frac{-1}{\gamma}}, & x \geq u, \quad se\ \gamma > 0, \\ 1-exp\left(-\frac{x-u}{\sigma_u}\right), & x \geq u, \quad se\ \gamma = 0, \\ 1-\left(1+\gamma\frac{x-u}{\sigma_u}\right)^{\frac{-1}{\gamma}}, & u \leq x \leq u-\frac{\sigma_u}{\gamma}, se\ \gamma < 0 \end{cases}$$

Para $\gamma > 0$, $\gamma = 0$ e $\gamma < 0$ a função distribuição GP reduz-se a um modelo Pareto, Exponencial e Beta, respetivamente. O threshold u será o parâmetro de localização, σ_u o parâmetro de escala e γ o parâmetro de forma. A escolha de um threshold origina maior dificuldade em garantir que os dados são independentes, ao contrário da GEV onde se tem máximos de amostras com comprimento fixo, garantindo a independência. A melhor distribuição pode ser avaliada através do Critério de Informação de Akaike (AIC) que representa uma métrica avaliadora da qualidade de um modelo estatístico visando também a sua simplicidade. Fornece, portanto, uma métrica para comparação e seleção de modelos, em que menores valores de AIC representam uma maior qualidade e simplicidade (Gonçalves e Lopes, 2003).

Outro conceito muito usado na análise de valores extremos é o de valor de retorno. Este engloba duas quantidades: o nível de retorno U e o período de retorno T. Estes dois conceitos estão interligados, pois, o nível de retorno U(T) é o valor que é excedido, em média, uma vez em cada T anos (período de retorno do nível U). O nível de retorno T-anos não é mais do que o quantil de probabilidade 1 – 1/T.

3. PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com vista à aplicação prática das metodologias apresentadas, a amostra em estudo compreende os desvios (diferença entre a altura da maré observada e a altura da maré astronómica prevista, devida essencialmente a fatores meteorológicos) do porto de Leixões, referentes ao período de 2002 a 2020.

Estes dados, foram disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico. As alturas horárias são expressas em metros e calculadas em relação ao zero hidrográfico (ZH) do porto, situado a 2m abaixo do nível médio adotado (Cascais, 1938) (IH, 2021).

A série de alturas horárias tem uma dimensão de 161462 observações, o que corresponde a 19 anos de dados, havendo valores omissos (Figura 1).

As lacunas nas observações foram preenchidas com o valor da mediana da amostra. Dados que todos os valores extremos são superiores à mediana, esta forma de imputação não enviesa os resultados da estimação dos parâmetros das distribuições de extremos. Com a série completa encontraram-se os máximos mensais representados graficamente na Figura 2, obtendo se assim 221 máximos para o estudo.

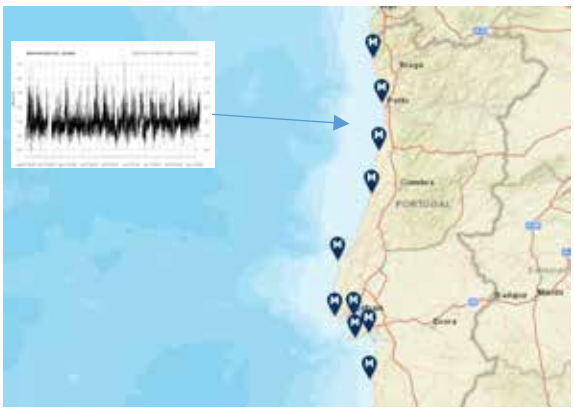


Fig. 1. Série temporal dos desvios de 2002 a 2020: Porto de Leixões (fonte: Instituto Hidrográfico).

Foi construída a série dos máximos mensais para o período em análise. Tem-se, portanto, um total de 221 meses. Estes desvios encontram-se representados na Figura 2.

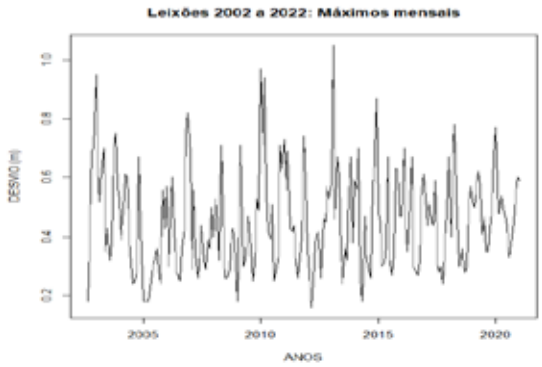


Fig. 2. Leixões 2002 a 2022: Máximos mensais.

Através do gráfico de auto correlação parcial, na Figura 3, poder-se-á avaliar a independência das observações.

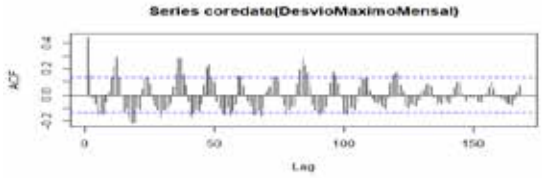


Fig. 3. Independência dos Desvios máximos mensais.

Como se pode observar, existe correlação entre as observações, pois o módulo da função de auto-correlação parcial ultrapassa os limites do intervalo de confiança a 95% para a correlação nula. Através da figura, também se observa alguma sazonalidade, facto a considerar na determinação dos parâmetros de localização e/ou escala que melhor ajustam a distribuição GEV.

Nesta amostra os desvios horários variam entre os 0,23m e 1,05m. Tem-se, uma amostra com uma acentuada assimetria à direita que é visível no histograma representado na Figura 4.

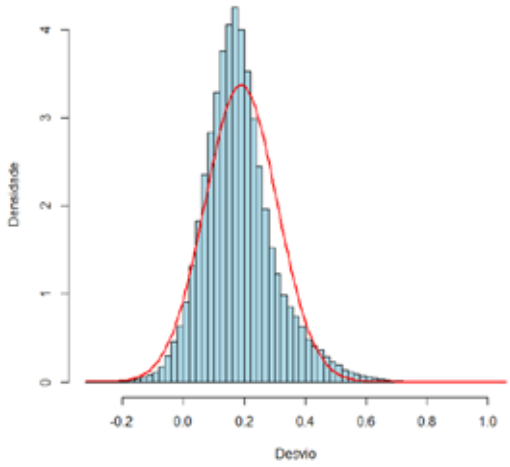


Fig. 4. Histograma dos desvios máximos mensais em Leixões.

Relativamente a cada distribuição, GEV e GP, foi encontrada uma estimativa para o parâmetro de forma γ; assim como encontrado o valor do AIC (Tabela 1).

Tab. 1. Comparação entre as distribuições GEV e Gumbel

	parâmetro forma	parâmetro escala	parâmetro localização	AIC
GEV	$\gamma = -0{,}041$	$\delta = 0{,}138$	$\lambda = 0{,}379$	-16,06
Gumbel	-	$\delta = 0{,}136$	$\lambda = 0{,}376$	-18,01

Uma vez que o valor AIC da distribuição de Gumbel é menor do que o da distribuição GEV, conclui-se que a distribuição de Gumbel apresenta maior qualidade. Assim, para essa distribuição, os períodos de retorno para desvios superiores a 80 cm é de, aproximadamente, 50 anos. Até ao final do século não se esperam desvios com altura superior a 1metro.

Seguidamente, efetuou-se o estudo da amostra através da GP. Neste caso, os blocos amostrais usados para calcular os máximos já não têm dimensão fixa, e surge a necessidade de estimar o *threshold* a usar. Se for demasiado elevado, perde-se a vantagem da distribuição GP relativamente à GEV; se for demasiado baixo, os valores podem ter correlação significativa entre si. Existe um método para estimar o *threshold*, a Figura 5 ilustra a aplicação de um estimador usado por Coles (2001). Com base nos resultados mostrados, foi escolhido o *threshold* = 0,45m.

Com a escolha deste *threshold* obteve-se uma amostra com dimensão de 103 desvios para o estudo do período de retorno.

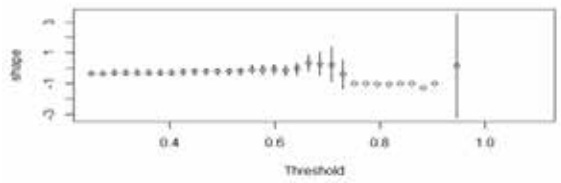


Fig. 5. Escolha do threshold para os máximos mensais.

Considerando a tendência do aumento do nível do mar e assumindo uma variação sazonal, é provável que em 10 anos, os desvios, sobre a maré astronómica, atinjam valores acima de 0,8m, no

entanto até ao final do século não se esperam sobrelevações superiores a 1,11m (Figura 6).

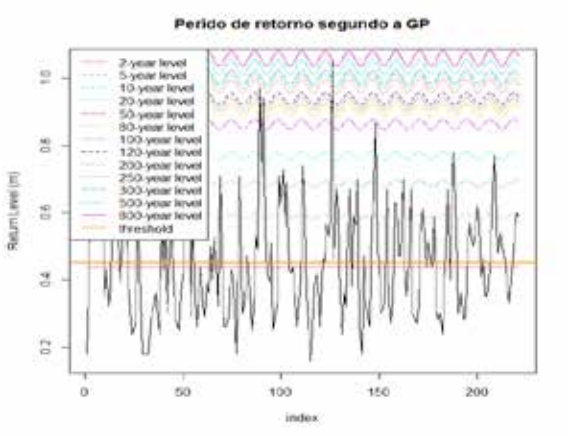


Fig. 6. Período de retorno calculado através da GP

Os desvios esperados, bem como o respetivo período de retorno são apresentados na Tabela 2.

Tab. 2. Resultados dos desvios e respetivo período de retorno para as duas distribuições

	5 Anos	**10 Anos**	**50 Anos**	**80 Anos**
Gumbel	0,60 m	0,68 m	0,88 m	0,93 m
GP	0,60 m	0,70 m	0,91 m	0,97 m

Através da capitania do Porto de Leixões, os cais do porto estão a uma altura de 6,33 metros em relação ao ZH. Assim, até ao final do século é pouco provável que existam fenómenos extremos que ultrapassem a altura dos cais, considerando a combinação entre a maior maré astronómica e o desvio máximo previstos (4,96 metros)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado um estudo dos valores extremos da sobrelevação devida à maré meteorológica no porto de Leixões, baseada na TVE. Através deste estudo respondeu-se às perguntas inicias levantadas, o desvio maior ocorrido foi de 1,05 metros, prevê-se que até ao final do século o maior nível de retorno será de 0,97 (estimado através da distribuição GP), sendo que este quando combinado com a maior maré astronómica não irá ultrapassar a altura dos cais.

Tendo em conta as previsões realizadas é possível afirmar que é pouco provável que existam galgamentos no Porto de Leixões e que as suas estruturas estão dimensionadas de forma a proteger o proto destes fenómenos. Há ainda a considerar os efeitos da agitação marítima e da ocorrência de seichas dentro do porto, mas devido ao abrigo proporcionado pelos molhos, no caso das primeiras, e a amplitude pequena das segundas, estes efeitos não afetam de forma significativa a sobrelevação da maré.

REFERÊNCIAS

Almeida, A., Taveira-Pinto, F., Veloso-Gomes, F., Moura Paredes, G. (2009). Análise das Marés Meteorológicas em Leixões. 6as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária.

Gomes, M. I., Alves, M. I. F., Neves, C. (2013). Análise de Valores Extremos: Uma Introdução. Sociedade Portuguesa de Estatística.

Guerreiro, R. I. R. (2015). Delimitação de áreas inundáveis – Estudo da ação combinada da maré e do escoamento superficial. Universidade Évora. Escola de Ciências e Tecnologia - Departamento de Engenharia Rural.

Gonçalves, E., Lopes, N. M. (2003). Estatística: Teoria e Aplicações. Escolar Editora.

IH (2021). Tabela de Marés, Portugal-VolumeI, Instituto Hidrográfico.

Pugh, D. T. (1987). Tides, Surges and Mean Sea Level. Wiley.

Coles, S. (2001) An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. First edition. London, England: Springer series in statistics.

Caracterização da tendência de subida do nível médio em Portugal

M. Picoto (1), D. Carinhas (2), C. Lemos (3)

(1) Escola Naval, Instituto Universitário Militar; migpicoto@gmail.com .

(2) Instituto Hidrográfico, IIFA/Universidade de Évora.

(3) CINAV, Escola Naval, Instituto Universitário Militar, Base Naval de Lisboa – Alfeite 2810-001, Almada.

Resumo: As alterações climáticas e as suas consequências são um dos temas dominantes na atualidade. Uma das consequências mais evidentes do aquecimento global é a tendência de subida do nível médio do mar, associada à fusão dos glaciares nas regiões polares e à expansão térmica da água dos oceanos. Esta tendência tem vindo a ser estudada desde há várias décadas a nível global, utilizando séries maregráficas longas e, mais recentemente, outros métodos de observação (por exemplo altimetria por satélite). Neste trabalho, pretende-se estender estudos já efetuados no Instituto Hidrográfico sobre a subida do nível médio do mar através da utilização de regressão linear e de técnicas de análise de séries temporais a registos maregráficos de portos nacionais. Por exemplo em Sines, o incremento foi de 106 milímetros nos 24 anos o que representa uma subida de 4.67 mm/ano, não se evidenciando nenhuma aceleração.

Palavras-chave: modelos de séries temporais, nível médio do mar, registos maregráficos, tendência do nível do mar.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, existe uma grande preocupação com a subida do nível médio do mar (NMM), porque este fenómeno tem, à escala global, um grande impacto na humanidade, nomeadamente nas atividades económicas e sociais.

Muitos são os fatores que influenciam o NMM e, em geral, fazem-se sentir no espaço e no tempo, com maior ou menor intensidade e interligação. A compreensão de muitos destes processos é, em muitos casos complexa, e apenas alguns fenómenos, como a maré astronómica, podem ser previstos de forma rigorosa. Em contrapartida, as variações inter-anuais são mais difíceis compreender e de prever. Em estudos de análise das variações do NMM, cujo objetivo é provar a relação entre estas e o atual aquecimento global, associado a atividades antrópicas, são muitas vezes omitidos ou subvalorizados os fenómenos a eles associados, os quais embora conhecidos não são quantificáveis de forma determinística (Dias e Taborda, 1988).

As variações na órbita terreste têm sido apontadas como um dos principais fenómenos de variação do clima e consequentemente do NMM ao longo do período Quaternário, entre 2.7 milhões de anos e 11.7 mil anos atrás. Após o último período glaciário e essencialmente durante o Período Holoceno, que se iniciou há 11.7 mil anos e perdura até ao presente, existem essencialmente dois grandes fenómenos, a nível global, que desencadeiam variações de longas escalas de tempo no NMM devido às interações Criosfera-Oceano-Atmosfera, sendo eles, os fenómenos eustáticos e isostáticos (Da Silva et al., 2014). Fenómenos eustáticos provocam variações no volume e na massa dos oceanos, enquanto os fenómenos isostáticos estão relacionados com a elevação ou subsidência da crosta terrestre, provocando uma variação relativa do NMM. As flutuações do NMM causadas por fenómenos glácio-eustáticos estão fortemente associadas ao aquecimento e arrefecimento global que, consequentemente, levam à fusão ou à formação das calotas polares e glaciares. Estes processos desenvolvem-se em escalas temporais de vários milénios. Durante os períodos glaciários, o nível do mar desce porque a humidade que é evaporada dos oceanos não é reposta, ficando aprisionada sob a forma de gelo nas calotas polares. Em períodos interglaciários, com temperaturas mais amenas, dá-se o recuo dos glaciares e, consequentemente, o aumento do NMM devido à reposição da água que estava retida nas calotas.

No último século verificou-se um aumento da tendência de subida do NMM, com particular incidência nas últimas décadas (Figura 1).

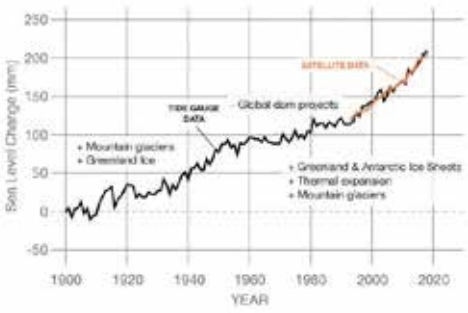


Fig. 1. Nível do mar entre 1900 2 2020: dados obtidos de observações de marés, em estações maregráficas (preto) e através de satélites (vermelho) (fonte: https://climate.nasa.gov/).

No entanto, essa subida do NMM é difícil de quantificar, porquanto:

(https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/):

1. Desconhece-se o comportamento geral desta subida, ou seja, desconhece-se o modelo (ou função) aplicável às recentes variações do NMM;
2. Os valores da tendência de subida apresentam diferenças notáveis de local para local (Figura 2);
3. O número de estações maregráficas, com séries de observações, suficientemente, significativas é bastante pequeno e a sua distribuição, pelo globo, é assimétrica.

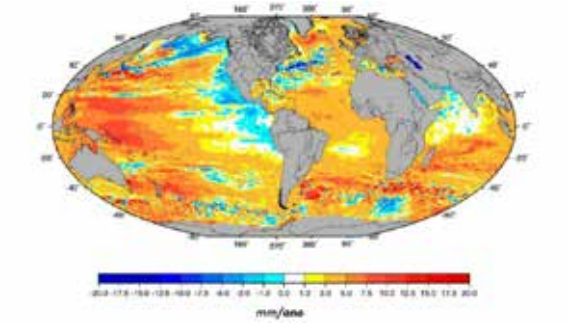


Fig. 2. Distribuição geográfica das tendências do nível do mar entre 1992-2008, obtidas através de altimetria de satélites (adaptado de Cazenave e Nerem, (2004)).

Em Portugal existem várias séries de registos maregráficos provenientes de marégrafos dispersos ao longo do seu litoral. Tanto os registos maregráficos de Cascais como de Lagos evidenciam uma tendência de aumento do NMM (Antunes e Taborda, 2009). No entanto, as análises das séries de dados maregráficos sugerem que o NMM não subiu com uma tendência consistente ao longo do tempo (Antunes e Taborda, 2009). Desde final do século XIX até por volta de 1915-1920, o NMM teve inclusive uma tendência negativa, -5± 0.4 mm/ano em Cascais (Ferreira et al., 2008). Só posteriormente a este período é que se nota uma tendência de subida do NMM. Mendes *et al*., (2020), tendo por bases a utilização de registos GPS, concluíram que os movimentos verticais na Península Ibérica são, na sua maioria, caracterizados por tendências de subsidência lentas/moderadas, com um valor médio de 0.6mm/ano, sendo que em Cascais se verificou uma tendência de 0.4 mm/ano. Isto significa que as séries maregráficas da estação de Cascais são fidedignas para serem usadas em estudos globais sobre o NMM e que podem ser usadas para caracterizar a tendência de subida do NMM.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A estatística desempenha um papel fundamental no processamento de dados porque permite inferir parâmetros caracterizadores de fenómenos com uma componente aleatória a partir de amostras. O seu principal objetivo é a recolha, a análise dos dados, inferência (determinação de parâmetros de distribuições ou relações funcionais) e interpretação dos resultados, de forma qualitativa e quantitativa. Quando se efetuam medições, é sempre expectável uma certa variabilidade da característica ou atributo que se está a medir. A variabilidade (também chamada de dispersão) refere-se à distribuição de um conjunto de dados. As quatro principais formas de descrever a variabilidade em um conjunto de dados são: Amplitude, Amplitude interquartil, Variância e Desvio padrão. Graficamente, a variabilidade pode ser avaliada através de gráficos *box-plot* e/ou histogramas.

Por definição, uma série temporal é uma sucessão de observações que evoluem no tempo, igualmente espaçadas (Murteira *et al*., 2000).

Segundo o modelo clássico todas as séries temporais são compostas de quatro padrões:

- tendência (T), que é o comportamento de longo prazo da série, que pode ser causada pelo crescimento ou decrescimento que afete a variável de interesse ao longo do tempo;

- variações cíclicas ou ciclos (C), flutuações nos valores da variável com duração superior a um ano, e que se repetem com certa periodicidade, que podem ser resultado de variações de fenómenos climáticos como o El Niño (que se repete com periodicidade superior a um ano);

- variações sazonais ou sazonalidade (S), flutuações nos valores da variável com duração inferior a um ano, e que se repetem todos os anos, geralmente em função das estações do ano, se os dados forem registados anualmente não haverá influência da sazonalidade na série;

- variações irregulares (I), que são as flutuações aleatórias, não correlacionadas entre si (ao contrário das variações descritas anteriormente), resultando de fatores fortuitos e inesperados, como fenómenos extremos e catástrofes naturais.

É importante salientar que nem sempre uma série temporal, mesmo que o modelo clássico seja considerado apropriado para analisá-la, irá apresentar todos os componentes citados.

A tendência descreve o comportamento da variável retratada na série temporal no longo prazo. Um dos objetivos principais na sua identificação é avaliar o seu comportamento para utilizá-lo em previsões. A obtenção da tendência pode ser feita de três formas: através de um modelo de regressão (como o modelo linear - reta), através de médias móveis, ou através de ajuste exponencial (que não deixa de ser uma média móvel) (Morettin e Toloi, 2018). O procedimento para a obtenção da tendência através da reta de regressão é semelhante ao usado na regressão linear simples, mas agora a variável independente será sempre o tempo. Para uma série registada anualmente, por exemplo, de 2005 a 2014, a variável

independente assumiria os valores dos anos. Para uma série registada mensalmente, por exemplo, com 60 meses, a variável independente poderia assumir os valores de 1 a 60. A tendência pode ser obtida através da equação $T = bt + a$;

onde:

t é o valor do tempo, no caso linear b é o declive da reta (se positivo indica tendência crescente, se negativo a tendência é decrescente) e a é o coeficiente linear da reta. As equações dos coeficientes são expressas por:

$$b = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n}(t_i \times Y_i) - \sum_{i=1}^{n} t_i \times \sum_{i=1}^{n} Y_i}{n \times \sum_{i=1}^{n}(t_i^2) - \left(\sum_{i=1}^{n} t_i\right)^2} \qquad a = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i - b \times \sum_{i=1}^{n} t_i}{n}$$

onde Y_i é um valor qualquer da variável registada na série temporal, t_i é o período associado a Y_i, e n é o número de dados da série. Para encontrar os coeficientes basta calcular os somatórios (tal como na análise de regressão linear simples).

3. RESULTADOS

Com vista à aplicação prática das metodologias apresentadas, a amostra em estudo compreende 288 NMM mensais, observados na estação maregráfica do porto de Sines (Figura 3), referentes ao período de 1997 a 2020. Estes dados, foram disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico (IH).

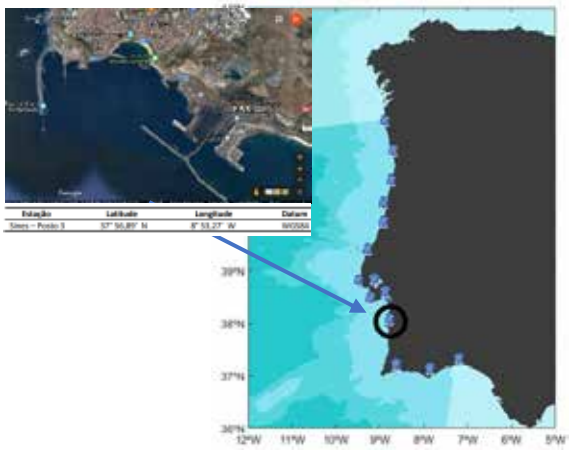


Fig. 3. Identificação do porto estudado (fonte: Divisão de Oceanografia do Instituto Hidrográfico).

O histograma (Figura 4) apresenta uma ligeira assimetria negativa (coeficiente de assimetria igual a -0.07, aproximadamente) demonstrando que a distribuição dos níveis médios mensais se concentra no lado direito da média (2198 mm com Intervalo de Confiança (95%) igual a (2191; 2206)) com uma ligeira cauda para o seu lado esquerdo. Através da aplicação do teste de normalidade de *shapiro-wilk*, obteve-se o valor p = 0.9516 ($\alpha = 0.05$), pelo que não se rejeita a hipótese da normalidade dos dados.

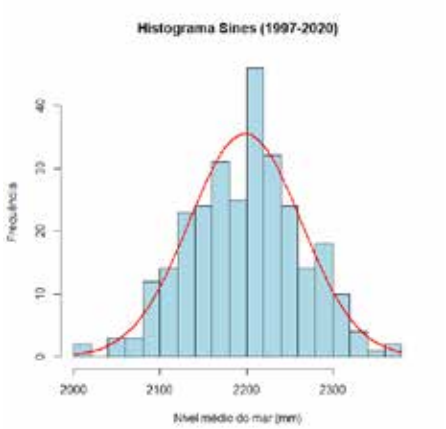


Fig. 4. Histograma de frequências dos níveis médios mensais em Sines no período 1997 - 2020.

A Tabela 1 apresenta as principais estatísticas descritivas dos NMM mensais (1997-2020):

Tabela 1. Estatísticas descritivas dos NMM mensais (mm) de Sines

NMM mensais (mm)	
Média	2198
Mediana	2205
Desvio-padrão	64,88
Assimetria	-0,07
Mínimo	2007
Máximo	2379
Dimensão da amostra	288

A Figura 5 apresenta a evolução dos níveis médios mensais e anuais em Sines até finais de 2020. Foi ajustada uma função linear aos níveis médios anuais, através de um polinómio de grau 1, com vista a representar a tendência dos níveis médios mensais.

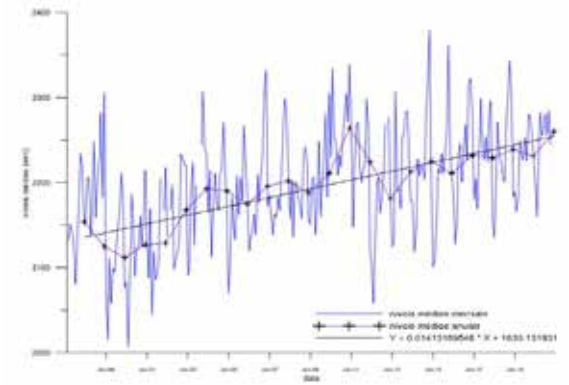


Fig. 5. Evolução dos níveis médios mensais e anuais, em Sines desde 1997 até finais de 2020.

Face ao declive positivo da reta de regressão obtida, pode-se concluir que o nível médio está a aumentar. O incremento foi de 106 milímetros nos 24 anos o que representa uma subida de 4.67 mm/ano, aproximadamente, não se evidenciando nenhuma aceleração. Durante o ano de 2020 o nível médio mensal máximo foi de 2441 mm registado em novembro e o nível médio mensal mínimo foi de 2160

mm registado em fevereiro. Dos 288 valores de nível médio mensal registados desde 1997, 95% situam-se no intervalo [2080; 2320] milímetros, sendo que 5% são superiores a 2300 mm e apenas 1% são inferiores a 2010 mm.

A Figura 6 apresenta as distribuições mensais dos níveis médios do mar registados no marégrafo de Sines 1997 e 2020:

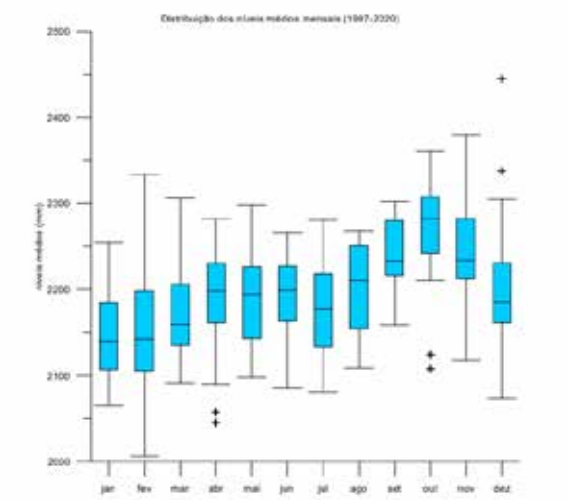


Fig. 6. Comportamento dos níveis médios ao longo do ano, em Sines no período 1997 a 2020.

É possível verificar que a variação do nível médio tem uma componente sazonal. Verificam-se acentuadas variações anuais e semi-anuais do NMM devido a variações sazonais da pressão atmosférica, da densidade da água e da circulação oceânica (Carinhas *et al*., 2021).

Esta análise é consistente com estudos já efetuados no IH. A Figura 7 ilustra os registos dos níveis médios mensais característicos para os diferentes portos nacionais:

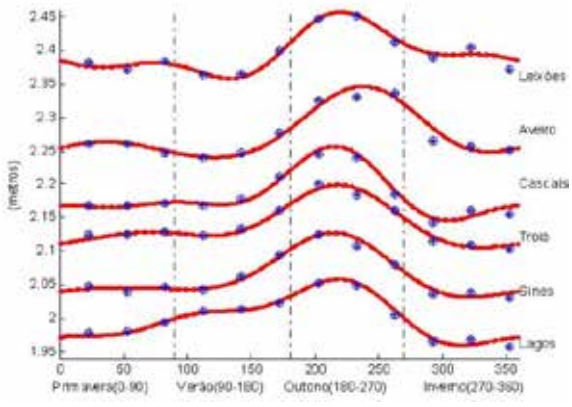


Fig. 7. Níveis médios mensais característicos (pontos azuis) com ajustamento dos níveis médios diários (vermelho) (fonte: Carinhas, et al., 2021).

Durante os meses de verão tendem a predominar as variações da densidade da água e nos meses de inverno as variações de origem meteorológica (Carinhas *et al*., 2021).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, procurou-se contribuir para o estudo das variações do NMM na costa de Portugal Continental a partir dos dados recolhidos pelo marégrafo de Sines entre 1997 e 2020. A longa série de dados permitiu apurar que o NMM está a subir neste local com uma tendência de 4.67±0.71 mm/ano. Foram ainda calculados os níveis médios mensais característicos, e verificada a existência de sazonalidade ao longo do ano. Observaram-se acentuadas variações anuais e semi-anuais do nível médio do mar devido a variações da pressão atmosférica, da densidade da água e da circulação oceânica. Em síntese, durante os meses de verão tendem a predominar as variações da densidade da água e nos meses de inverno as variações de origem meteorológica.

Como trabalho futuro, pretendem-se aplicar o modelo de média móvel sazonal integrada autorregressiva (SARIMA) (Murteira *et al*., 2000), para tentar compreender melhor a estrutura de variabilidade do nível médio e analisar a possibilidade de efetuar previsões mais rigorosas do que é possível obter a partir de modelos de regressão linear.

REFERÊNCIAS

Antunes, C., Taborda, R., (2009). Sea level at Cascais tide gauge: data, analysis and results. Journal of Coastal Research, 218-222

Cazenave, A., Nerem, R. (2004). Present-day Sea Level Change: Observations and Causes. Rev. Geophys. 42. (doi:10.1029/2003RG000139)

Carinhas, D., Infante, P., Martinho, A., Vasquez, F. As marés ao serviço da variação do nível médio do mar. Apresentado no XXV Congresso da Sociedade Portuguesa de Estatística – SPE 2021, Évora., Portugal, outubro de 2021.

Da Silva, A. A. A., Freire, E., & Crisóstomo, G. (2014). Variações do nível médio anual do mar em Cascais: características e tendências. Estudos do Quaternário/Quaternary Studies, (5).

Dias, J., Taborda, R. (1988). Evolução recente do nível médio do mar em Portugal, Anais do Instituto hidrográfico 9, 83-97

Mendes, V. B., Barbosa, S. M. and Carinhas, D. (2020). "Vertical land motion in the Iberian Atlantic coast and its implications for sea level change evaluation" Journal of Applied Geodesy, vol. 14, no. 3, 2020, pp. 361-378. (doi:10.1515/jag-2020-0012)

Morettin, P. A., & Toloi, C. M. (2018). Análise de séries temporais: modelos lineares univariados. Editora Blucher.

Murteira, B., Müller, D., & Turkman, K. F. (2000). Análise de sucessões cronológicas.

Caracterização da propagação da maré na costa ocidental portuguesa

F. Silva (1), D. Carinhas (2), C. Lemos (1)

(1) Escola Naval, Instituto Universitário Militar; fredericorsilva@gmail.com.

(2) Instituto Hidrográfico, IIFA/Universidade de Évora.

(3) CINAV, Escola Naval, Instituto Universitário Militar, Base Naval de Lisboa – Alfeite 2810-001, Almada.

Resumo: A configuração dos fundos e da linha de costa na zona costeira de Portugal Continental influenciam a propagação da onda de maré junto à costa. Os registos maregráficos, obtidos nas estações da Rede Maregráfica Nacional, permitiram caracterizar o tipo de maré e efetuar análise e previsão da maré astronómica nos principais portos nacionais. Ao longo da costa de Portugal Continental, a maré é do tipo semidiurno regular, o que permite deduzir certas relações entre a amplitude e o retardo das principais constituintes semidiurnas, através do método não-harmónico. Neste trabalho, apresentam-se comparações e concordâncias entre marégrafos próximos, para diferentes áreas e portos principais. Foram também analisadas possíveis alterações dessas relações ao longo do tempo. Os métodos descritos no presente trabalho têm interesse para a previsão expedita da altura de maré, por exemplo em operações anfíbias em pontos para os quais não é possível calcular previsões da maré através do método harmónico.

Palavras-chave: concordâncias de maré, constituintes harmónicas, constituintes não harmónicas, dados maregráficos, maré.

1. INTRODUÇÃO

O Instituto Hidrográfico (IH) gere a maior rede de observações maregráficas nacional, operando e mantendo 23 estações maregráficas em cooperação com entidades públicas ou privadas.

O conhecimento da maré é de grande importância para as mais variadas aplicações, como por exemplo: navegação em canais, estuários, baías e portos; projetos de engenharia como a construção de pontes, docas e quebra-mares; apoio a levantamentos hidrográficos, inclusivamente no estabelecimento do *datum* de cartas, e na delimitação da linha de costa oficial; para calibração de modelos hidrodinâmicos; no fornecimento de informação à engenharia militar, à pesca profissional e recreativa, à navegação e noutras atividades aquáticas para a população em geral (Pugh, 1987).

O estudo e análise dos fenómenos das marés é um assunto há muito estudado e resolvido, sendo algo complexo tendo em vista a obtenção de modelos de alta precisão e exatidão. As variações espácio-temporais das forças geradoras da maré (diferença entre a força de atração gravitacional num ponto à superfície da Terra e no centro de massa desta última) devidas à Lua e ao Sol são conhecidas. No entanto, a propagação da onda de maré ao longo da costa é perturbada por diversos fatores: variação da profundidade, fenómenos oceânicos diversos, o contorno dos continentes, entre outros.

A maré astronómica que se faz sentir em Portugal é do tipo semidiurno, com uma desigualdade diurna (diferença entre duas preias-mar (PM) ou baixas-mar (BM) consecutivas) reduzida, variando entre os 5 e os 20cm (Reis e Martins, 2005). No território continental, a amplitude média da maré astronómica é de, aproximadamente, 2m, podendo atingir uma altura em águas-vivas de 4m (APA, 2013). A maré semidiurna é caracterizada por uma onda com um período médio de 12h 25min, tendo duas preia-mar e duas baixa-mar diárias, o que resulta num atraso diário médio de 50 minutos aproximadamente. Ao longo da costa de Portugal Continental, a onda de maré evolui de sul para norte, demorando cerca de 35 minutos de Lagos a Leixões, o que equivale a uma velocidade média de 840 km/h (APA, 2013) este facto justifica os atrasos que se vão fazendo sentir entre os diferentes portos.

A Figura 1 apresenta as amplitudes (em metros) e as fases do retardo modificado (em graus) das principais constituintes harmónicas semi-diurnas ao longo da costa ocidental portuguesa.

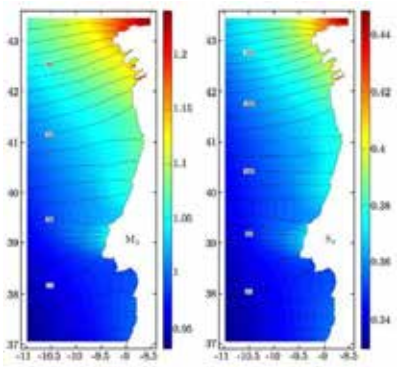


Fig. 1. Amplitude (escala de cores em metros) e fase (graus) das constituintes harmónicas M2 e S2 (adaptado de Marta-Almeida e Dubert, 2006).

A Figura 2 apresenta as amplitudes (em metros) e as fases (em graus) das principais constituintes harmónicas diurnas ao longo da costa ocidental portuguesa.

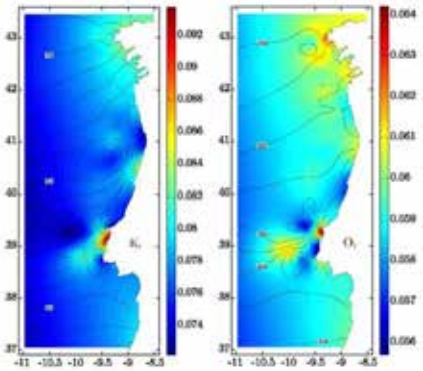


Fig. 2. Amplitude (escala de cores em metros) e fase (graus) das constituintes harmónicas K1 e O1 (adaptado de Marta-Almeida e Dubert, 2006).

Com este trabalho pretende-se apresentar técnicas que permitem caracterizar a maré de um porto deduzindo certas relações entre a amplitude e o retardo das principais constituintes semidiurnas, recorrendo às constantes não harmónicas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A maré pode ser prevista através do método harmónico que permite a identificação, para cada local, da amplitude e da fase de cada constituinte de maré. Este método é a base da análise e da previsão da maré, e baseia-se no conceito de maré de equilíbrio e no princípio de Laplace. Já o método não harmónico é útil quando as amplitudes das constituintes M2 e S2 são dominantes relativamente a todas as outras. Apenas se a maré for do tipo semidiurna regular é que pode ser prevista de forma menos rigorosa através do método não harmónico.

No IH são calculadas várias constantes não harmónicas para definir a maré para cada porto, nomeadamente, o tipo de maré, a relação das forças atrativas, a unidade de altura, o estabelecimento médio e o estabelecimento do porto e também a idade de maré. Estes valores serão determinados a partir das constantes harmónicas e estas obtêm-se através de uma série temporal de observações, com o recurso à análise harmónica. As constantes harmónicas não dependem do tempo e, como são típicas de cada porto, constituem uma base fundamental para a caracterização da maré num dado local, dependendo delas a boa qualidade das previsões. Os seus valores podem ser afetados por fenómenos como a erosão, assoreamentos e obras portuárias, pelo que é recomendado (Schureman, 1988; Pugh, 1987) uma renovação periódica, sempre que possível, das constantes harmónicas nos diversos portos.

As concordâncias de maré são parâmetros de desfasamento da onda de maré entre dois portos que apresentem o mesmo regime de maré, habitualmente entre um porto principal e um porto secundário existente nas imediações. Estes parâmetros são usados e aplicados para a determinação da maré em portos secundários, onde não foi observado um período anual completo de registo de maré, com vista à sua parametrização por via do método de análise harmónica (cálculo das constituintes harmónicas de maré), usando dados maregráficos obtidos através das diversas estações maregráficas localizadas em diversos portos da costa portuguesa e disponíveis no IH. Para aplicar este método, algumas premissas têm de ser verificadas, nomeadamente, marés do mesmo tipo nos dois portos, proximidade geográfica (desejável), e dispor de um mínimo de 15 observações de alturas horárias da maré no porto secundário. De acordo com Reis e Martins (2005), com um registo de pelo menos 15 dias de observações, é possível inferir as constantes harmónicas das constituintes M2, S2, K1 e O1.

Os chamados "elementos de maré" são também muito úteis para caracterizar a maré num porto. São eles os valores médios e extremos das PM e BM, sendo o seu cálculo diferente, conforme a sua aplicação, quer se destinem às cartas náuticas ou às tabelas de marés. Os elementos de maré que se encontram nas Tabelas de Marés publicadas pelo Instituto Hidrográfico, são calculados com base nos valores das previsões para esse ano, sendo os valores da preia-mar máxima (PMmáx) e da baixa-mar mínima (BMmin) os extremos. Os elementos de maré apresentados nas cartas náuticas publicadas pelo Instituto Hidrográfico são representativas de um ciclo nodal lunar completo (Schureman, 1988; Simon, 2013), uma vez que estas não são actualizadas anualmente. Assim, calculam-se os valores médios a partir das constantes harmónicas e, para o caso da PM máxima e BM mínima, publicam-se os valores extremos encontrados em previsões com, pelo menos, 19 anos consecutivos (Doodson e Warburg, 1941).

O Tipo de Maré (R) permite aferir que a maré em toda a costa portuguesa é do tipo semidiurna regular (valores de R < 0,25) (Instituto Hidrográfico, 1984):

$$R = \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2} + H_{S_2}}$$

A relação das forças atrativas (β) compara a amplitude da onda lunar média (M2) com a onda solar média (S2) (Instituto Hidrográfico, 1984):

$$\beta = \frac{H_{M_2}}{H_{S_2}} \quad .$$

Quanto maior o valor de β menor é a diferença e amplitudes entre águas vivas e águas mortas. Inversamente, valores baixos de β indicam grandes diferenças entre águas vivas e águas mortas.

A unidade de altura (U), ou semi-amplitude das marés vivas equinociais (denominada, deste modo, por autores que consideram a amplitude de maré desde a

PM à BM) é a soma das amplitudes das constituintes M2, S2 e K2 e fornece uma ideia geral da ordem de grandeza das amplitudes registadas num dado local (Instituto Hidrográfico, 1984): $U = H_{M_2} + H_{S_2} + H_{K_2}$.

A constituinte K2, que representa as variações em declinação da Lua e do Sol, está em fase com a S2 duas vezes no ano, precisamente nos equinócios. Relacionado com o conceito de unidade de altura está o conceito de coeficiente de maré que constitui uma amplitude de maré normalizada. A unidade de altura, U, constitui uma maré padrão para cada local à qual é atribuído o coeficiente de maré de 100. Conhecendo a amplitude da maré, H, o coeficiente de maré, c, é dado pela expressão (Instituto Hidrográfico, 1984):

$c = \frac{H}{U} \times 100$.

A Tabela 1 apresenta coeficientes de maré correspondentes a situações típicas. Os valores apresentados pressupõem uma relação aproximada da amplitude entre as constituintes M2, S2 e K2, respectivamente de 70%, 25% e 5% da unidade de altura (Instituto Hidrográfico, 1984):

Tabela. 1. Tabela de Coeficientes de Maré para situações típicas.

Coeficiente de Maré	Situação Típica
20	Águas mortas mínimas
45	Águas mortas médias
95	Águas vivas médias
100	Águas vivas de equinócio
120	Águas vivas máximas

Existem, também, parâmetros não harmónicos que permitem caracterizar a maré em termos temporais.

O estabelecimento médio representa o atraso médio entre a ocorrência de uma PM e a passagem da lua média pelo meridiano do lugar. O estabelecimento médio é dado pela seguinte expressão (Instituto Hidrográfico, 1984):

$EM = \frac{k_{M_2}}{w_{M_2}}$.

Note-se que ω representa a velocidade angular da constituinte e k a sua fase.

O estabelecimento do porto representa o retardo da PM semidiurna da tarde que se produziria em dia de sizígia (posição da Lua em Lua Nova ou Lua Cheia), com a Lua e o Sol no Equador e à distância média da Terra. A expressão, seginte, permite determinar o estabelecimento do porto (Instituto Hidrográfico, 1984):

$$EP = \frac{k_{M_2}}{w_{M_2}} + \frac{1}{w_{M_2}} \arctan\left(\frac{\sin(k_{S_2} - k_{M_2})}{H_{M_2} / H_{S_2} + \cos(k_{S_2} - k_{M_2})}\right).$$

A idade da maré determina o atraso médio da maré viva em relação à sizígia, ou seja, o atraso entre a ocorrência da maré viva, e a Lua Nova ou Lua Cheia correspondente. A expressão da idade de maré é a seguinte (Instituto Hidrográfico, 1984):

$IM = \frac{k_{S_2} - k_{M_2}}{w_{S_2} - w_{M_2}}$.

Três dos parâmetros, apresentados, podem ser usados como métodos expeditos de previsão de maré, nomeadamente, o estabelecimento do porto (EP) ou o estabelecimento médio (EM) para o cálculo da hora da maré, a idade da maré (IM) para se saber quando ocorre a maré viva e, ainda, a unidade de altura (U) para o cálculo da altura da maré na PM e na BM.

3. RESULTADOS

Para este resumo, foram considerados 3 dos 13 portos, continentais, incluídos no volume 1 da publicação Tabela de Marés.

Na Figura 3 ilustra as localizações dos portos estudados.



Fig. 3. Identificação dos portos estudados (adaptado da Tabela de Marés VolumeI – Portugal 2022).

Para as três estações de observação em estudo, Viana do Castelo, Leixões e Aveiro, foram determinados os parâmetros estatísticos presentes na Tabela 2. Nesta tabela, observa-se que o valor da mediana das alturas horárias de água registadas aumenta de sul para norte.

Tabela. 2. Dados estatísticos das estações em estudo das observações do mês de janeiro de 2021.

Parâmetro estatístico	*Viana do Castelo*	*Leixões*	*Aveiro*
Média (m)	2.24	2.24	2.25
Mediana (m)	2.27	2.26	2.26
Desvio-padrão (m)	0.79	0.80	0.74
Mínimo (m)	0.62	0.62	0.71
Máximo (m)	3.90	3.87	3.72

A Tabela 3 apresenta os elementos de maré calculados a partir de 36 anos de previsão (1990-2025).

Tabela 3. Elementos de maré.

ESTAÇÃO MAREGRÁFICA	PMMAX	PMAV	PMAM	NMA	BMAM	BMAV	BMMIN
VIANA DO CASTELO	3.95	3.41	2.68	2.00	1.32	0.59	0.10
LEIXÕES	3.90	3.41	2.68	2.00	1.32	0.59	0.14
AVEIRO	3.77	3.30	2.64	2.00	1.36	0.70	0.25
FIGUEIRA DA FOZ	3.94	3.39	2.67	2.00	1.33	0.61	0.14
PENICHE	3.94	3.39	2.67	2.00	1.33	0.61	0.13
SESIMBRA	3.86	3.33	2.63	2.00	1.37	0.67	0.18
SINES	3.87	3.34	2.64	2.00	1.36	0.66	0.19

Legenda:

PMmáx - preia-mar máxima (metros)

PMAV - preia-mar de águas-vivas (metros)

PMAM - preia-mar de águas-mortas (metros)

NMA - nível médio adotado (metros)

BMAM - baixa-mar de águas-mortas (metros)

BMAV - baixa-mar de águas-vivas (metros)

BMmin - baixa-mar mínima (metros)

Para determinar as características fundamentais da maré num porto, é suficiente conhecer as constantes harmónicas das constituintes semidiurnas M2, S2 e N2, e das constituintes diurnas K1 e O1 (Tabela 4).

Tabela.4. Constantes harmónicas das contituintes usadas para o cálculo das contantes não harmónicas.

ESTAÇÃO MAREGRÁFICA	M2		S2		K1		O1		K2	
	H.m	G°	H.m	G°	H.m	G°	H.m	G°	H.m	G°
VIANA DO CASTELO	1.044	75.9	0.364	104.1	0.071	61.3	0.062	319.0	0.104	102.5
LEIXÕES	1.044	76.1	0.366	104.4	0.070	60.2	0.062	319.4	0.104	102.4
AVEIRO	0.969	78.9	0.330	107.5	0.062	63.4	0.055	321.1	0.093	104.5
FIGUEIRA DA FOZ	1.033	75.4	0.361	104.1	0.066	63.0	0.061	319.4	0.101	100.4
PENICHE	1.030	69.8	0.360	97.2	0.075	55.6	0.062	315.6	0.101	93.9
SESIMBRA	0.980	64.0	0.346	90.0	0.069	54.7	0.060	314.9	0.097	87.9
SINES	0.988	63.3	0.351	90.3	0.071	53.8	0.061	314.2	0.096	87.0

As constantes não harmónicas calculadas são apresentadas na Tabela 5.

Tabela. 5. Constantes não harmónicas

ESTAÇÃO MAREGRÁFICA	R	β	U	EM	EP	IM
VIANA DO CASTELO	0.09	2.87	1.512	2:01	2:16	27:33
LEIXÕES	0.09	2.85	1.514	2:02	2:17	28:03
AVEIRO	0.09	2.94	1.392	2:07	2:22	28:02
FIGUEIRA DA FOZ	0.09	2.86	1.495	1:59	2:14	28:08
PENICHE	0.10	2.86	1.491	1:46	2:00	26:58
SESIMBRA	0.10	2.83	1.423	1:35	1:49	25:29
SINES	0.10	2.81	1.435	1:34	1:49	26:28

Para a maioria dos portos portugueses a relação das forças atrativas é aproximadamente 3, confirmando a ideia de que a influência da Lua na maré é cerca de 3 vezes superior à do Sol. Para todos os portos da costa continental portuguesa, a unidade de altura é muito próxima de 1.5 m.

É possível obter os valores de PM e BM, por comparação, com valores de PM e BM do marégrafo principal mais próximo. Com o objetivo de caracterizar as diferenças entre as marés de Leixões, Viana do Castelo e Aveiro, apresentam-se as concordâncias de maré, calculadas, entre os dados maregráficos de Leixões e os registos maregráficos dos outros dois portos. Os valores de concordância de maré apresentados na Tabela 5 foram determinados por comparação direta entre os valores observados, nos três portos, durante o mês de janeiro de 2021.

Tabela. 5. Concordâncias de maré de Viana do Castelo e Aveiro, relativamente às marés de Leixões

			Aveiro	Viana do Castelo
Águas-vivas	Preia-mar	Tempo (min)	+19	-3
		Altura (cm)	-11	-1
	Baixa-mar	Tempo (min)	-1	0
		Altura (cm)	+10	+1
Águas-mortas	Preia-mar	Tempo (min)	+15	-1
		Altura (cm)	-7	0
	Baixa-mar	Tempo (min)	0	+2
		Altura (cm)	+5	+1

As diferenças que existem em tempo e em altura são valores médios, ou seja, têm uma menor precisão em relação ao real.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho pretende apresentar técnicas que permitem caracterizar a maré de um porto deduzindo certas relações entre a amplitude e o retardo das principais constituintes semidiurnas, recorrendo às constantes não harmónicas.

Os valores das preia-mar máximas, e em águas vivas e águas mortas são semelhantes nos portos de Leixões, Aveiro e Viana do Castelo, observando-se apenas pequenas diferenças, de alguns centímetros, nas marés e menos de cinco minutos em tempo entre Leixões e Viana do Castelo, sendo que as marés nesses portos são muito semelhantes.

REFERÊNCIAS

APA (2013). Caracterização do regime de mares. Entregável 1.1.3.a

Foreman, M. G. G. (1977). Manual for tidel heights analysis and prediction. Patricia Bay, Sidney, B.C: Institute of Ocean Science, (Pacific Marine Science Reports 77-10).

Instituto Hidrográfico (1984). Apontamentos Sobre Marés e Correntes de Maré, Volumes I, II e III, Divisão de Marés e Correntes de Maré, Ministério da Defesa Nacional – Marinha, Lisboa, Portugal.

Marta-Almeida, M., Dubert, J. (2006). The structure of tides in the Western Iberian region. Continental Shelf Research, Volume 26, Issue 3, p. 385-400.

Pugh, D. T. (1987). Tides, Surges and Mean Sea Level. Wiley.

Reis, J., Martins, L. (2005). Caracterização da Maré de um Porto, 4 as Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária, Angra do Heroísmo, Portugal.

Simon, B., (1974), Calcul des Constantes Harmoniques de la Marée, EPSHOM

Schureman, P., (1988), Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides, U.S. Government Printing Office.

Monitorização da agitação marítima nas praias de Matosinhos e Internacional

V. Lima (1), R. Esteves (1), N. Zacarias (1), F. Diniz (1), H. Lopes (2)

(1) Instituto Hidrográfico (IH), vania.lima@hidrografico.pt

(2) Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A. (APDL)

Resumo: Encontra-se em curso o projeto de prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões com vista o melhoramento das condições de operacionalidade da barra do Porto de Leixões. Na área de influência respeitante a estas intervenções estão localizadas as praias de Matosinhos e Internacional, sendo necessário conhecer as condições de agitação marítima incidente na praia, o que é possível através da monitorização da agitação marítima da zona. A prestação de serviços existente entre a Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A. (APDL), e o Instituto Hidrográfico (IH) contempla a monitorização das condições de agitação marítima incidentes nas praias de Matosinhos e Internacional. Com vista a aquisição e monitorização da agitação marítima local, o IH instalou 5 boias ondógrafo na área em estudo. Nesta comunicação apresentam-se os trabalhos desenvolvidos durante o primeiro ano de operação, observações dos instrumentos oceanográficos e comparações preliminares entre observações instrumentais e numéricas.

Palavras-chave: agitação marítima, boias ondógrafo, monitorização, observações, praias de Matosinhos e Internacional.

1. INTRODUÇÃO

No âmbito da prestação de serviços existente entre o IH e a APDL encontra-se em curso, desde Outubro de 2020, a monitorização das condições de agitação marítima na praia de Matosinhos e área adjacente. Esta monitorização enquadra-se no projeto de prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, com vista o melhoramento das condições de operacionalidade da barra do Porto de Leixões. No início do projeto foi definida a instalação de 5 boias ondógrafo na área de influência das praias de Matosinhos e Internacional, para o registo das características das ondas que incidem na área de interesse (Figura. 1, Tabela. I). Para o efeito foram utilizados os 5 pontos de observação indicados na Figura.1.

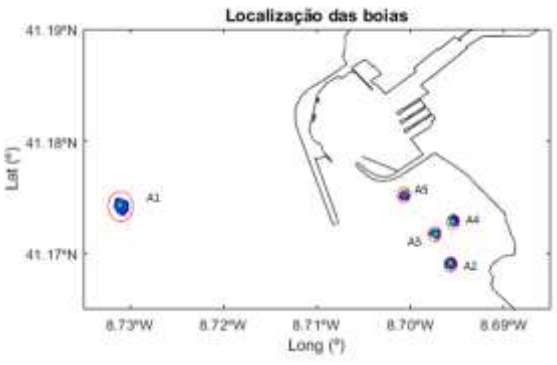


Figura.1. Localização dos equipamentos oceanográficos instalados na zona da praia de Matosinhos, em outubro de 2020.

Por motivos distintos, foi necessário no decorrer do projeto proceder à alteração dos equipamentos oceanográficos instalados. Existiram diversas dificuldades operacionais na medição da agitação marítima, como consequência da localização dos pontos de observação em baixas profundidades e da sua proximidade à linha de costa. O elevado tráfego marítimo na zona originou diversos episódios de deriva, abalroamentos, entre outros. Considerando então os vários desafios técnicos e eventos pontuais que pautam o funcionamento dos equipamentos oceanográficos, foram instalados diferentes equipamentos em períodos específicos de tempo, de modo a garantir um registo continuo da agitação marítima nesses pontos, com o mínimo de interrupções possíveis. Neste momento os equipamentos instalados contemplam boias ondógrafo Datawell Directional Waverider, perfiladores acústicos de corrente ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) RDI e boias SOFAR Spotter.

Tabela.I. Lista dos equipamentos instalados e a sua localização, em outubro 2020.

		Coordenadas (WGS84)			
Pontos	Nome boias	Latitude	Longitude	Profundidade (m)	Data fundeamento
Ponto PB	APDL1	041° 10.451N	008° 43.861W	24.8	14/10/2020
Ponto PA	APDL2	041° 10.143N	008° 41.742W	11.8	15/10/2020
Ponto P32	APDL3	041° 10.302N	008° 41.843W	13.1	15/10/2020
Ponto P36	APDL4	041° 10.371N	008° 41.723W	7.7	14/10/2020
Ponto P34	APDL5	041° 10.509N	008° 42.040W	9.5	14/10/2020

2. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

Cada tipologia de equipamento utilizado neste projeto apresenta características técnicas distintas, como a taxa de amostragem, a resolução, a precisão, a periodicidade de envio de dados, entre outras. A boia Datawell Directional Waverider permite seguir a

superfície livre do oceano, medindo a sua aceleração e a aceleração das três componentes do campo magnético terrestre. A medição dos dados é efetuada com uma taxa de amostragem de 1.28 Hz. A partir dos sinais da aceleração são calculados internamente na boia os deslocamentos verticais (elevações) e os deslocamentos horizontais, segundo os eixos N-S e E-W. Além das séries temporais referidas, são ainda adquiridos parâmetros como a temperatura da água à superfície, o estado das baterias, a posição GPS da boia, entre outros. Os dados adquiridos em tempo real pela boia são transmitidos por VHF para a estação de receção, que está localizada no farol do molhe Sul de Matosinhos e enviados para o IH.

O ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) permite adquirir dados de correntes e de agitação marítima. Com periodicidade horária, o módulo de ondas adquire 2048 amostras, a uma taxa de 2 Hz durante aproximadamente 17 minutos, da velocidade orbital em 12 células distribuídas ao longo da coluna de água, da ecolocalização da superfície e da pressão. Estes dados permitem derivar de forma independente três espetros de ondas a partir dos quais se estimam os parâmetros de agitação marítima. O equipamento é instalado junto ao fundo e os seus dados são armazenados internamente, não havendo transmissão em tempo real dos mesmos.

A boia SOFAR Spotter é um equipamento compacto e de baixo custo, que permite seguir a superfície livre do oceano e medir o deslocamento 3D da superfície, com uma taxa de amostragem de 2.5Hz. A medição dos movimentos da superfície livre tem como base o sistema GPS. Através da aquisição das séries temporais nas 3 direções de deslocamento é estimado o espectro de energia e são calculados os parâmetros de agitação marítima. Com periodicidade horária, estes parâmetros são enviados por satélite Iridium.

Seguindo um procedimento standard, os dados de cada equipamento são objeto de processamentos específicos, em que inicialmente as séries temporais adquiridas são separadas em registos de 30 min (em registos de 18 min no caso dos ADCP). Os parâmetros característicos da agitação marítima são estimados, tanto no domínio do tempo (método direto), como no domínio da frequência (método espectral). Para cada parâmetro calculado, relativo aos dados de cada equipamento, procede-se a um controlo de qualidade adequado de cada registo, após o qual os dados são analisados e utilizados.

3. HISTÓRICO DE INSTALAÇÃO

Foram definidos 5 pontos de observação para instalação de instrumentação nas proximidades das praias de Matosinhos e Internacional (

Tabela.I). Porém, em alguns casos as localizações destes pontos foram modificadas por motivos operacionais. De facto, desde o inicio da instalação dos equipamentos oceanográficos na área de estudo foram registados vários episódios, que interromperam a aquisição de dados. Em alguns casos a instrumentação foi substituída, pelo que o tipo de instrumento instalado num dado ponto de observação pode variar.

Usando como fio condutor a informação constante na Tabela I, faz-se uma breve descrição do tipo de instrumentação instalada em cada ponto de observação, durante o período compreendido entre Outubro de 2020 e Setembro de 2021. No ponto de observação APDL1 está instalada uma boia Datawell desde o início desta prestação de serviços, apesar dos episódios de deriva e abalroamento a que foi sujeita. No ponto de observação APDL2 esteve inicialmente instalada uma boia Datawell, posteriormente substituída por um perfilador acústico. Na posição APDL3 esteve uma boia Datawell, que foi substituída por uma boia Spotter, dada a sua adequação para monitorizar a agitação marítima nesta área e a sua facilidade de operação em áreas costeiras. No ponto de observação APDL4 estiveram instaladas uma boia Datawell e uma boia Spotter, estando atualmente um ADCP junto ao fundo, devido ao elevado tráfego marítimo no local. Em APDL5 esteve instalada uma boia Datawell, que por motivos operacionais, foi substituída por uma boia Spotter, a qual se encontra atualmente instalada neste ponto. No período de Inverno de 2020/2021, que foi um Inverno com muitos temporais, verificou-se que, durante eventos mais energéticos, as posições das boias APDL2 e APDL4 se encontravam na zona de rebentação, o que apresentou limitações operacionais das mesmas. Adicionalmente, no ponto de observação APDL2 existem afloramentos rochosos que contribuem para a rebentação junto a esta posição. Por esse motivo, foi modificada a instrumentação em APDL2 e alterada a localização do ponto de observação APDL4 para uma zona de maior profundidade APDL4-B. No período de abril a setembro de 2021 foi registado um temporal de 24 a 25 de maio.

4. ANÁLISE

As séries temporais anuais das alturas de ondas máxima e significativa (Hmax e Hm0, respetivamente), os períodos médio e de pico (T02 e Tp, respetivamente) e a direção média associada ao período de pico (Thtp), registadas nos pontos de observação APDL1, APDL2, APDL3, APDL4-B e APDL5, correspondentes ao período de Outubro de 2020 a Setembro/Outubro de 2021, estão representadas da Figura.2 a Figura.6. Destas séries temporais anuais vemos que os pontos de observação que estiveram mais tempo inoperacionais foram o ponto APDL1 – onde esteve sempre instalada uma boia Datawell Directional Waverider – e o ponto APDL4-B (inicialmente APDL4), onde foram colocados 3 tipos de instrumentos distintos desde o início desta prestação de serviços e onde atualmente se encontra um ADCP. Ambos os pontos de

observação apresentaram desafios técnicos operacionais devido ao elevado tráfego marítimo. Adicionalmente, a posição inicial da APDL4 teve se ser reavaliada devido à sua localização em baixa profundidade. No ponto APDL5 foi possível garantir uma aquisição contínua dos dados de agitação marítima, pelo facto de se encontrar numa área mais abrigada, devido à sua proximidade ao molhe do porto de Leixões. A monitorização deste ponto foi garantida com base numa boia Datawell e numa boia SOFAR Spotter, a qual está atualmente instalada neste ponto de observação. Como referência, em Fevereiro de 2022, encontravam-se instaladas 2 boias SOFAR Spotter, 1 boia Datawell Directional Waverider e 2 ADCPs RDI, nos 5 pontos de observação.

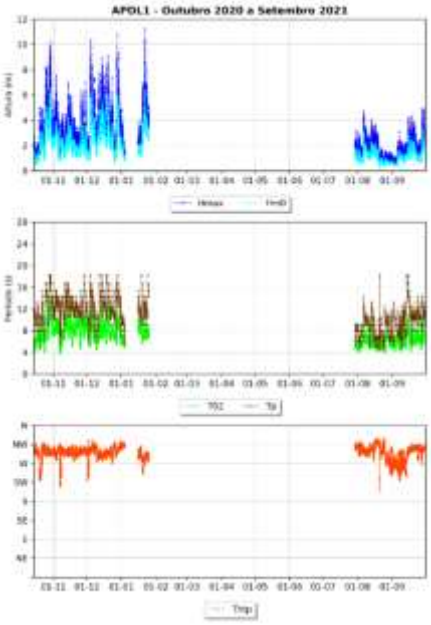


Figura.2. APDL1: séries temporais de alturas de onda Hmax e Hm0, períodos T02 e Tp e direção Thtp.

No âmbito do estudo de avaliação dos impactos do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões e das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões, realizado pelo LNEC e documentado em LNEC (2017), foi analisada a influência do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões nas condições de agitação marítima da praia de Matosinhos. Neste estudo do LNEC foram selecionadas 7 localizações dos 20 pontos de controlo situados na zona da praia de Matosinhos para análise e apresentação de resultados, tendo sido considerado que esses 7 pontos permitem analisar as condições de agitação marítima que se verificam nessa zona. Foram analisadas as alturas de onda em frente à praia de Matosinhos e a posição da linha de rebentação face à linha de praia. Para tal foi utilizado o modelo numérico linear de elementos finitos DREAMS (Fortes, 1993), baseado na equação de declive suave de Berkhoff (1972), adequado para estudos de propagação de agitação marítima em portos e bacias abrigadas. Nas simulações efetuaram-se os cálculos sistemáticos de ondas regulares e foram consideradas aquilo que designam como Situação Atual, que se refere à configuração atual da barra e do canal de acesso, e seis configurações distintas do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões (LNEC, 2017). Os resultados do modelo são dados sob a forma de valores dos índices de agitação e de direção de onda, correspondentes a todo o domínio de cálculo.

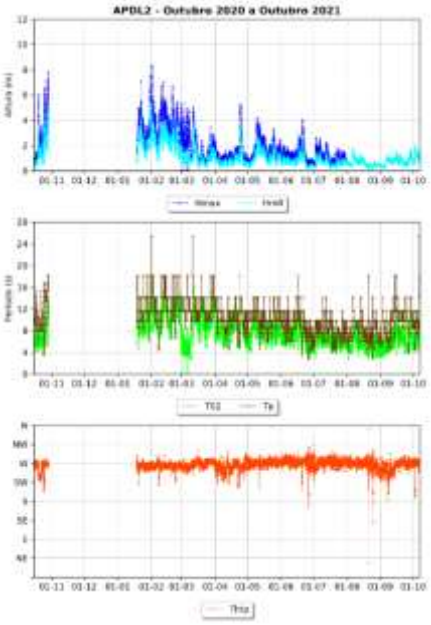


Figura.3. APDL2: séries temporais de alturas de onda Hmax e Hm0, períodos T02 e Tp e direção Thtp.

Os cálculos feitos pelo modelo DREAMS basearam-se nas condições de agitação marítima num ponto situado na entrada do Porto de Leixões, tendo sido assumidas condições de agitação regular específicas: períodos de onda de 4 a 18 s (com intervalo de 1 s); direções de onda à entrada do domínio de cálculo de 180° a 360° (com intervalo de 22.5°); nível de maré de +0.5 m (ZHL) a +4.0 m (ZHL), com intervalo de 0.5 m. Assim, deve considerar-se que as observações instrumentais adquiridas pelo IH se configuram naquilo que designam como a Situação Atual em LNEC (2017).

Deste modo, relativamente à análise apresentada em LNEC (2017), em que é contemplado o número de dias em que as ondas rebentam e são considerados limites de rebentação específicos para os pontos APDL3 e APDL4, foi concluído que nestes pontos de observação não existem ondas que rebentem. Porém, aquilo que se verificou de facto em termos operacionais foi que inicialmente, no período de outubro a dezembro de 2020, a boia Datawell, APDL4, teve ser mudada de posição exatamente por se encontrar na zona de rebentação. Esta alteração de

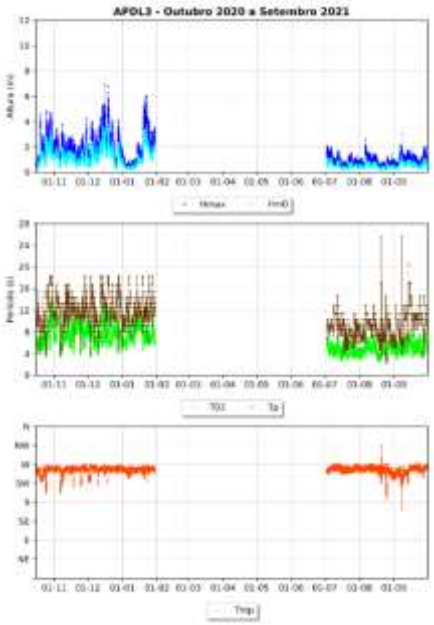


Figura 4. APDL3: séries temporais de alturas de onda Hmax e Hm0, períodos T02 e Tp e direção Thtp.

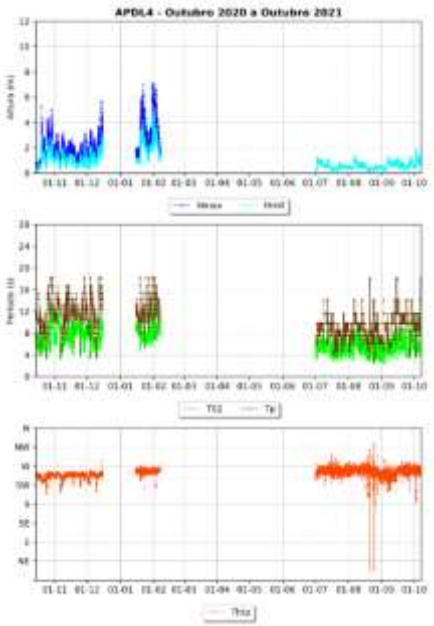


Figura.5. APDL4: séries temporais de alturas de onda Hmax e Hm0, períodos T02 e Tp e direção Thtp.

posição sucedeu em janeiro de 2021, tendo havido também alteração de instrumentação para uma boia Spotter que, por ser mais leve e de pequena dimensão, se torna mais adequada de utilizar nesta localização. No ponto inicialmente selecionado a boia encontrava-se a 6 m de profundidade; na nova posição a boia Spotter passou a estar a uma profundidade de 12 m. Devido ao elevado tráfego marítimo na área próxima deste ponto de observação, optou-se por instalar um ADCP nesta posição, alteração efetuada em julho 2021.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A prestação de serviços entre o IH e APDL contempla a monitorização das condições de agitação marítima incidentes nas praias de Matosinhos e Internacional. Para tal foram instalados equipamentos, tais como boias ondógrafo Datawell Directional Waverider, perfiladores acústicos de corrente ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) RDI e boias SOFAR Spotter, em 5 pontos de observação distintos. Neste trabalho descrevemos o primeiro ano de operação dos equipamentos.

Em janeiro de 2022 foi realizada uma nova manutenção dos equipamentos instalados na praia de Matosinhos e área adjacente. Durante o próximo semestre será dada continuidade à monitorização e manutenção dos equipamentos instalados.

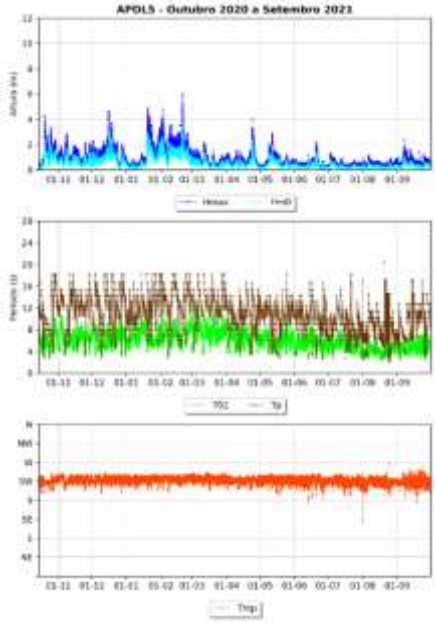


Figura.6. APDL5: séries temporais de alturas de onda Hmax e Hm0, períodos T02 e Tp e direção Thtp.

REFERÊNCIAS

Berkhoff (1972). Computation of combined refraction-diffraction. Proc. 13th International Conference in Coastal Engineering, Vancouver, Canada, Vol.2, pp. 471-490.

Fortes, C.J.E.M. (1993). Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas (análise pelo método dos elementos finitos). Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, IST, Lisboa, Portugal.

LNEC (2017). Estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas do porto de leixões: Estudo II – Avaliação dos impactes do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões nas condições de agitação da praia de Matosinhos. Relatório final." *Relatório 306/2017 DHA/NPE*. 128 pp, Lisboa, abril 2017.

Fluid-structure interaction of a leading depression N-wave shaped tsunami

V. Lima (1, 2, 4), P. Avilez-Valente (3,4), M.A. Baptista (2,5), M. Miranda (2,6)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. vania.lima@hidrografico.pt

(2) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, Edifício C1 — Piso 1, 1749-016 Lisboa, Portugal.

(3) Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal.

(4) Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental, Universidade do Porto, Terminal de Cruzeiros de Leixões, Av. General Norton de Matos s/n, 4450-208 Matosinhos, Portugal.

(5) Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa, Portugal.

(6) Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Rua C do Aeroporto, 1749-077 Lisboa, Portugal.

Abstract: In this work, we present a 2DV study of the interaction of a tsunami wave with the Cascais marina breakwater. The numerical modelling is performed with the open-source computational fluid dynamics software OpenFOAM and the olaFlow toolbox. The tsunami wave, which resembles a leading depression N-wave, enters the domain from Southwest with a wave height of about 6 m. We show that the Cascais breakwater is overtopped by the tsunami wave and that vortices are generated on the seaward and leeward sides of the breakwater. We perform an analysis of the pressure distribution on the walls and crest of the breakwater and show that negative pressures arise on the leeward side of the breakwater.

Key words: computational fluid dynamics, fluid-structure interaction, N-wave; tsunami.

1. THE N-WAVE CONCEPT

A tsunami wave can be described as a long wave in shallow water. Such a wave has a wavelength λ which is much larger than the depth h of the water it is propagating in, i.e. $h/\lambda \ll 1$. A common approach is to model tsunamis as solitary waves, both in experimental and numerical studies. Madsen et al. (2008) discussed the solitary wave paradigm in tsunami research and concluded that, in general, tsunamis do not generate solitary-like waves in the ocean or on the continental shelf. In fact, not all tsunami events are alike and reports of shoreline receding support the concept of N-shaped tsunami waves (cf. Figure 1). The N-wave concept was introduced by Tadepalli and Synolakis (1994), who suggested that an N-wave is the most adequate to describe the main tsunami wave. N-waves can be described as having a leading trough, the so-called leading depression N-wave (LDN-wave), or a leading crest, a leading elevation N-wave (LEN-wave). A conceptual N-wave was modelled by Tadepalli and Synolakis (1994, 1996) as

$$\eta(x,t) = \varepsilon\,(\theta - \kappa\,\delta)\,H\,\mathrm{sech}^2\big(\kappa\,(x - c\,t - x_1)\big)\,,$$

where ε is a scale factor necessary to define the wave height as H, $\delta = x_2 - x_1$ is an eccentricity parameter, defined as the distance between $x = x_2$, the location of the inflexion point of the wave profile at $t = 0$, i.e. $\eta(x_2, 0) = 0$, and $x = x_1$, the location at $t = 0$ of the crest of a solitary wave of the same height H and length λ, c is the wave velocity, and $\kappa = 2\pi/\lambda$ is a generalized wavenumber. The wave height H of a N-wave is obtained as $H = a^+ + a^-$, where a^+ is the amplitude of the wave crest and a^- is the amplitude of the wave trough.

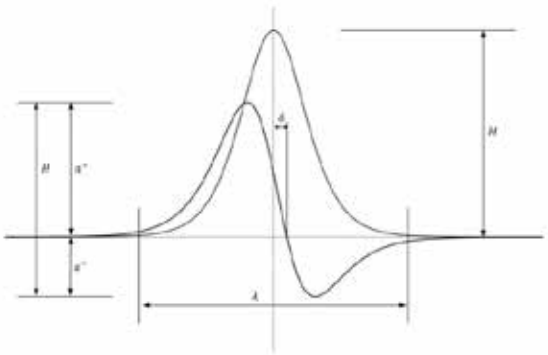


Figure 1. N-wave profile and corresponding solitary wave of the same height H and length λ.

2. COMPUTATIONAL MODELLING

To model nearshore processes in two- and three-dimensional domains and to determine the properties and characteristics of tsunami interaction with coastal structures and surrounding areas, the open access numerical code OpenFOAM (OpenCFD Limited, 2019) and the olaFlow toolbox (Higuera, 2019) are used. OpenFOAM uses the finite volume method to solve computational fluid dynamics problems and includes several approaches to tackle turbulence. The olaFlow solver package (Higuera, 2019) consists of a set of solvers for the simulation of wave dynamics, enabling

the generation and absorption of waves at the boundaries and wave interaction with coastal structures. olaFlow solves the Volume Averaged Reynolds-Averaged Navier-Stokes (VARANS) equations for the two incompressible phases, applying the finite volume (FV) discretisation method for numerical integration, and the volume of fluid (VOF) method for phase definition.

3. SIMULATION AND RESULTS

We modelled an earthquake event, located at the Horseshoe Abyssal Plain, triggering a tsunami with SW–NE incident direction (for more details see Lima, 2022). The modelled tsunami wave signal (see Figure 2) was retrieved at a point in the vicinity of the Cascais marina, at a depth $d = 16$ m. At that point, the wave closely resembled the Tadepalli and Synolakis' conceptual LDN-wave, with $a^+ = 4.44$ m, $a^- = 1.68$ m, and an apparent period $T = 12$ min. Assuming $c = \sqrt{g(d + a^+)}$, with the acceleration of gravity $g = 9.81$ m/s^2, the apparent wavelength can be estimated as $\lambda = 10.2$ km. The free surface elevation time series (Figure 2) and the horizontal particle velocity, considered as constant in the water column, computed as

$$u(t) = c\ \eta/h\,,$$

were used as boundary condition for the 2DV (two dimensional vertical) simulation.

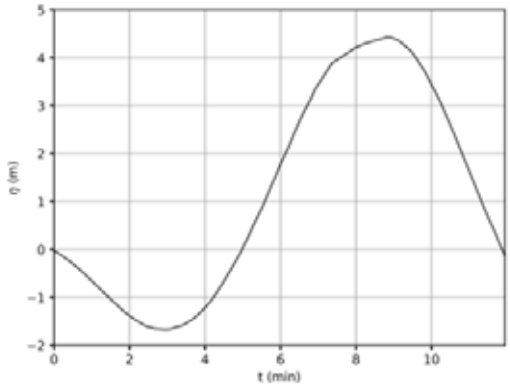


Figure 2. Free surface elevation time series of the leading wave.

The computational domain contemplates an initial 650 m-long slope, followed by the 50 m-wide breakwater berm. The computational domain includes a cross-section through the marina southwest breakwater, the marina basin, and the marina technical pier wall (cf. Figure 4).

For the simulations, we consider a 3D canal, one cell wide ($Ly = 10$ m), with a total length $Lx = 830$ m and height $Lz = 30$ m. The cell resolution varies along the computational domain. In the x-direction, for instance, the cell size varies from $\Delta x = 1$ m to $\Delta x = 5$ m (cf. Table I). The still water depth was $d = 16$ m, the total run time was 715 s, and a time step $\Delta t = 1$ s was used.

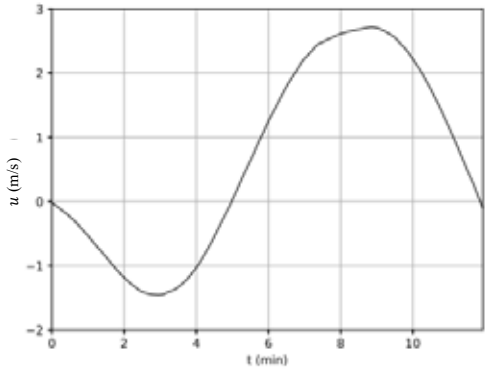


Figure. 3. Horizontal particle velocity time series.

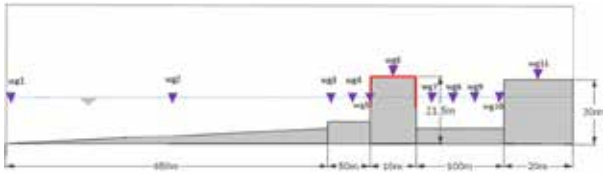


Figure 4. 2DV computational domain for the Cascais marina (not to scale) and wave gauges locations.

Table. I. Computational domain and mesh characteristics.

Zone	Slope	Berm	Breakwater	Basin	Technical pier
Lx (m)	650	50	10	100	20
Ly (m)	10	10	10	10	10
Lz (m)	10	13.5	21.5	11	20
Δx (m)	5	1	1	1	5
Δy (m)	10	10	10	10	10
Δz (m)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

The buoyancy-modified κ-ω SST turbulence model (Devolder et al, 2017) was used. This is a turbulence model tailored for simulation of wave propagation in VOF models. To mode correctly model the surface waves more correctly, those authors introduced an additional buoyancy term to eliminate the spurious turbulence generation, hence the wave height dissipation of surface waves. They concluded that the inclusion in their model of a density gradient at the air-water interface better simulated the turbulent wave energy dissipation.

Figure. 5 and Figure. 6 illustrate the propagation of the tsunami wave from the beginning of the simulation until after the wave overtop the breakwater at $t = 7.6$ min. At $t = 3.7$ min, the wave receding is perfectly perceptible. After $t = 10$ min, the technical pier wall is flooded. The flow depth reaches 1 m both at the top of the breakwater and at the top of the technical pier (Figure. 7 and Figure. 8).

The streamlines are shown in Figure. 9 and Figure. 10. A vortex is clearly identifiable over the seaward side berm of the breakwater. A second vortex is observed on the leeward side of the breakwater. Higher velocities are registered on the leeward side of the breakwater and between that structure and the technical pier.on the leeward side of the breakwater. Higher velocities are registered on the leeward side of the

breakwater and between that structure and the technical pier.

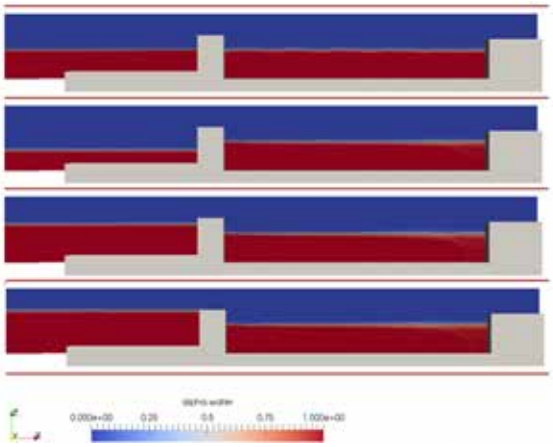


Figure. 5. Time evolution of the tsunami wave over the marina of Cascais. Top to bottom: $t = 5$ s, 3.7 min, 6.7 min and 7.2 min.

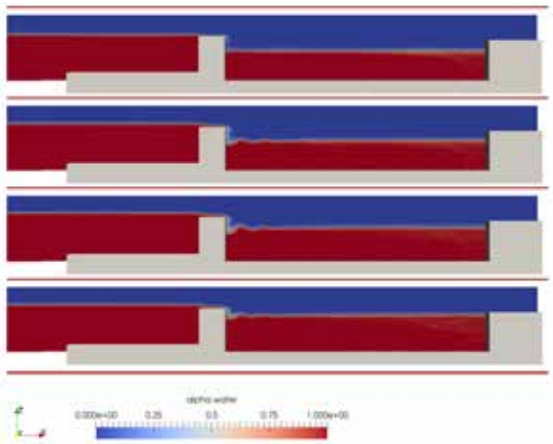


Figure. 6. Time evolution of the tsunami wave over the marina of Cascais. Top to bottom: $t = 7.6$ min, 8.0 min, 8.7 min and 9.4 min.

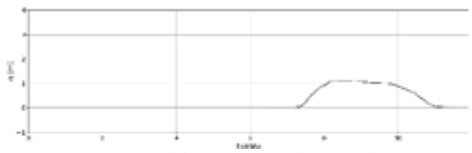


Figure. 7. Time series of the water level at breakwater crest (gauge wg6).

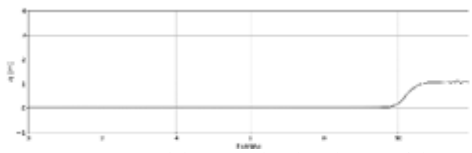


Figure. 8. Time series of the water level at the top of the technical pier (gauge wg11).

Numerical pressure gauges were placed along the breakwater walls and crest (see Figure 4). Analysis of the instantaneous pressure distribution along these surfaces showed that the pressures on the crest decrease from the seaward to the leeward side, becoming negative, i.e. below atmospheric pressure, at the inner end of the crest and at the upper end of the leeward wall of the breakwater (cf. Figure 11, Figure. 12, Figure. 13).

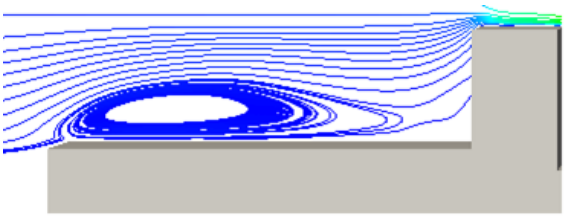


Figure. 9. Streamlines on the seaward side of the breakwater for $t = 8.7$ min.

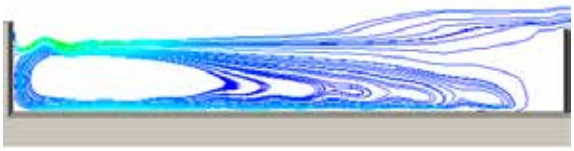


Figure. 10. Streamlines within the marina basin, for $t = 8.7$ min.

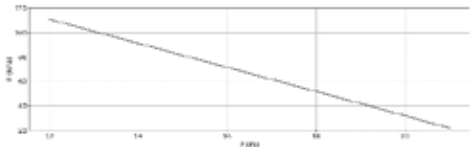


Figure 11. Instantaneous pressure distribution on the seaward side of the breakwater for $t = 8.2$ min.

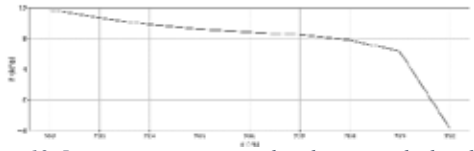


Figure. 12. Instantaneous pressure distribution on the breakwater crest for $t = 8.2$ min.

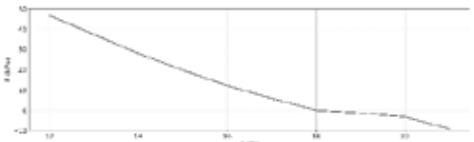


Figure. 13 – Instantaneous pressure distribution on the leeward side of the breakwater for $t = 8.2$ min.

The vortices and recirculation effects observed on both sides of the breakwater point to the possible occurrence of scouring, sand suspension and erosion, and consequent deballasting of the structure. This, together with the negative pressure recorded on the leeward side of the breakwater, may lead to the collapse of the structure.

The numerical simulations results presented herein have not been validated with any laboratory experiments nor with a real tsunami event. However, OpenFOAM has been previously used for this type of study (Morichon et al., 2021) and validated by Jiang et al. (2016), who performed small-scale laboratory experiments of tsunami-like solitary waves impacting a rectangular seawall.

In a preliminary stage, an attempt was made to perform 3D simulations, but these proved not to be supportable due to the limited cluster resources available, the large amount of time required for the simulations, the large size occupied by the output simulation results and the limited post-processing capabilities.

For this reason, it was chosen to perform the 2DV simulations. However, this will ignore some 3D effects, such as currents generated along the breakwaters, and the 3D patterns of the vortices that may lead to asymmetric erosion along the breakwater walls. In addition, inundation of the marina basin will also occur due to overtopping of the southeast breakwater. Finally, the effect on the northeast marina entrance is also overlooked. However, we believe that this 2DV analysis, although limited, can prove quite useful on a breakwater stability analysis of the breakwaters in the event of a tsunami impact.

4. CONCLUSIONS

A 2DV study of the interaction of a tsunami wave with the defence structures of the Cascais marina was presented. It was found that the initial tsunami wave shows a profile very close to the conceptual N-wave model of Tadepalli and Synolakis, thus the N-wave profile is used in this study for the tsunami wave numerical modelling.

The numerical modelling performed with OpenFOAM and the olaFlow toolbox showed that the Cascais breakwater is subject to overtopping by the tsunami wave and consequent inundation of the marina basin. We also show that vortices are generated on the seaward and leeward sides of the breakwater.

Analysis of the pressure distribution on the walls and crest of the breakwater shows that the leeward side of the breakwater is subjected to negative pressures. Together with the recirculation effect generated by the vortices, this may contribute to scouring, sand suspension and erosion at those location, which may lead to the collapse of the breakwater.

As future work, a full 3D simulation will be carried out to analyse how the vortices develop along the breakwater walls, to describe the currents generated within the marina, and to quantify the forces applied on the structures and their risk of collapse.

The numerical simulation of the wave-shore interaction must be limited in terms of area, due to the constraints in the computational resources available.

Acknowledgements
The first author was supported by FCT grant SFRH/BD/96725/2013. 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 (NORTE 2020) through the European Regional Development Fund.

REFERENCES

Devolder, B., Rauwoens, P., and Troch, P. (2017). Application of a buoyancy-modified κ – ω SST turbulence model to simulate wave run-up around a monopile subjected to regular waves using OpenFOAM®. *Coastal Engineering*, 125, 81–94.

Higuera P. (2019). olaflow. https://olaflow.github.io/, https://doi.org/10.5281/zenodo.1297012. Accessed: 2022-05-08.

Jiang, C., Liu, X., Yao, Y., Deng, B., and Chen, J. (2017). Numerical investigation of tsunami-like solitary wave interaction with a seawall. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 11(01), 1740006.

Lima, V.V. (2022). *A Combined Model for Tsunami Wave Propagation, Dispersion, Breaking and Fluid-Structure Interaction*. Doctoral dissertation. Faculty of Sciences of the University of Lisbon, Portugal.

Madsen, P.A., Fuhrman, D.R., and Schäffer, H.A. (2008). On the solitary wave paradigm for tsunamis. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C12).

Morichon, D., Roeber, V., Martin-Medina, M., Bellafont, F., and Abadie, S. (2021). Tsunami impact on a detached breakwater: Insights from two numerical models. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 147(2), 05021001.

OpenCFD Limited (2019). OpenFOAM® - The Open Source CFD Toolbox. https://www.openfoam.com/. Accessed: 2022-05-08.

Tadepalli, S., and Synolakis, C.E. (1994). The run-up of N-waves on sloping beaches. *Proceedings of the Royal Society: Mathematical and Physical Sciences,* A445, 99–112.

Tadepalli, S., and Synolakis, C.E. (1996). Model for the leading waves of tsunamis. *Physical Review Letters*, 77, 2141–2144.

Influência da orografia, orientação de linha de costa e temperatura de superfície do mar na estrutura do vento junto à costa

J. Alves (1,2), R. Caldeira (1,2), P. Miranda (2)

(1) Observatório Oceânico da Madeira - ARDITI (jose.alves@oom.arditi.pt)

(2) Instituto Dom Luiz – Universidade de Lisboa

Resumo: Normalmente o vento costeiro sofre um enfraquecimento na direção da linha de costa. A variabilidade espacial deste enfraquecimento depende da orografia costeira, orientação da linha de costa e interação vento-temperatura superfície do mar. Foi feita uma simulação numérica acoplada oceano-atmosfera de alta resolução (3 km) no sistema de afloramento costeiro da corrente das Canárias para estudar as características do vento junto ao litoral. Os resultados mostram que a intensidade do vento decresce mais significativamente em zonas com uma elevada orografia, podendo em média decair até 70% nos 200 km mais próximos da costa. A influência das ilhas na dinâmica da baixa atmosfera e oceano superficial também foi analisada. Os dados simulados foram validados com valores medidos em estações meteorológicas e boias oceanográficas junto aos arquipélagos da Madeira e das Canárias.

Palavras-chave: afloramento costeiro, arquipélagos da Madeira e Canárias, interação oceano-atmosfera, modelação numérica.

1. INTRODUÇÃO

Este estudo visa caracterizar o enfraquecimento do vento costeiro, nomeadamente a sua variabilidade espacial no sistema de afloramento costeiro da corrente das Canárias, através da análise de dados de uma simulação numérica acoplada oceano-atmosfera. Devido à localização próxima dos arquipélagos das Canárias e da Madeira, avaliou-se também a influência das ilhas na atmosfera e no oceano regional. Uma vez que estes arquipélagos atuam como um obstáculo ao vento alísio, as ilhas induzem instabilidades no escoamento atmosférico a jusante, tais como, esteiras atmosféricas (Grubišic et al, 2015), geração de vórtices (Caldeira et al, 2002) e jatos junto aos flancos Este e Oeste das ilhas (Alves et al., 2020), que consequentemente perturbam a circulação e estratificação oceânica regional, por centenas de km com impacto na turbulência associada e consequentemente, na resposta biogeoquímica. De forma sucinta, os principais objetivos deste estudo são: 1. avaliar a influência da orografia continental-insular e da orientação da linha de costa na estrutura do vento costeiro; 2. analisar o impacto dos jatos atmosféricos, observados junto aos flancos das ilhas e aos principais cabos da costa africana, nas camadas superiores do oceano.

2. SIMULAÇÕES NÚMERICAS

Como ferramenta numérica foi utilizado o sistema de modelação Coupled-Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment-Transport (COAWST), composto por o modelo atmosférico Weather Research and Forecasting (WRF v4.2.2) e o modelo oceânico Regional Ocean Modeling System (ROMS v3.9), com os dois modelos acoplados bi-direcionalmente com o Model Coupler Toolkit (MCT). Na simulação acoplada os dados são transferidos entre os modelos a cada 30 minutos. Para uma descrição dos procedimentos de acoplamento e das variáveis trocadas entre os modelos o leitor deve consultar Warner et al (2008). Antes da simulação acoplada, foi feito uma simulação de 5 anos (2014-2018) apenas com o modelo ROMS forçado à superfície com dados da reanálise atmosférica ERA5 do Centro Europeu (ECMWF). Nas condições fronteira e iniciais do oceano foram utilizados dados de uma reanálise global (GLORYS12V1), com resolução de 1/12°, que no ano analisado (2019) foi forçada com a reanálise atmosférica ERA5, a mesma reanálise usada nas condições iniciais e fronteira do modelo atmosférico, o que torna consistente a transferência de momento e fluxos de calor simulados na interface oceano-atmosfera. Para as condições fronteiras no oceano usamos uma condição de Chapman para superfície livre, uma condição de Shchepetkin para correntes barotrópicas (2D) e uma condição de nudging-radiação para correntes baroclínicas (3D). O forçamento de marés foi considerado com 10 constituintes de maré (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm) do modelo global TPX09. Para a configuração WRF foram utilizadas as seguintes parametrizações: o esquema microfísico WRF Single-Moment 6-class; o esquema cumulus de Kain-Fritch para parametrização convectiva; o modelo de transferência radiativa rápida (RRTM) para radiação de longo comprimento de onda; o esquema Dudhia para radiação de curto comprimento de onda; o esquema Noah para a superfície terrestre, o esquema de similaridade Monin-Obukhov para a camada de superfície e o esquema Grenier-Bretherton-McCaa (GBM) para a camada limite planetária. Este último foi escolhido devido ao seu desempenho superior em estudos de interação oceano-atmosfera, como referido, por exemplo, em Samelson et al, (2020). O modelo atmosférico foi forçado nas fronteiras com

uma periodicidade de 3 horas e o modelo oceânico com periodicidade de 24 horas. A simulação acoplada foi inicializada a 1 de janeiro de 2019, mas apenas os meses de verão, julho-agosto-setembro (doravante JAS) foram analisados, por esta ser a estação em que os jatos junto às ilhas e aos cabos são mais intensos.
A configuração da simulação possui 3 domínios computacionais com aproximadamente 27, 9 e 3 km para a atmosfera, e 2 domínios computacionais com aproximadamente 9 e 3 km, para o oceano, cujos limites geográficos estão representados na figura 1. Para a discretização vertical foram utilizados 50 níveis verticais híbridos no WRF e 40 níveis sigma no ROMS. Para representar com precisão a orografia, usamos os dados SRTM com uma resolução de 3 segundos de arco e para a batimetria dados GEBCO com uma resolução de 15 segundos de arco. O domínio interior (3km) engloba a secção central do sistema de afloramento costeiro das Canárias e os arquipélagos da Madeira e das Canárias.

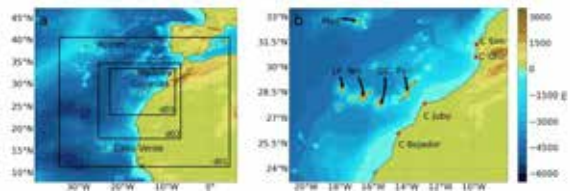


Fig. 1. Topografia e batimetria do GEBCO (General Bathymetric Charts of the Oceans) com uma resolução espacial de 15 segundos de arco. No painel a), os retângulos representam os limites geográficos dos domínios WRF e ROMS. O domínio externo (d01) com espaçamento de 27 km, e os internos com espaçamento de 9 (d02) e 3 km (d03), respetivamente. No painel b) é indicada a posição de algumas ilhas dos Arquipélagos da Madeira e Canárias, (Mad- Madeira, LP- La Palma, Ten – Tenerife, GC- Gran Canaria, Fv- Fuerteventura), bem como a posição dos principais cabos na costa africana em estudo (Sim, Ghir, Juby e Bojador).

3. PRECISÃO DAS SIMULAÇÕES

Para avaliar a precisão da tensão do vento simulada numericamente, usamos um produto multi-sensor, livre de lacunas, com uma resolução de 0,25º que permitiu avaliar a tensão do vento em todo o domínio computacional de 3 km. Após interpolação dos dados simulados para a resolução dos dados de satélite, a maior parte do domínio exibe uma tensão de vento simulada maior do que a observada com sensores de satélite (Figura 2a), mas com diferenças inferiores a 0,1 $N.m^{-2}$, em quase todas as regiões. As exceções ocorrem em zonas de vento intenso, como junto aos flancos das ilhas e perto dos principais cabos da costa de Africa, o que muito provavelmente se deve à falta de resolução espacial dos dados de satélite. Em média, o viés de tensão do vento médio no domínio a 3km é de +0,004 $N.m^{-2}$.

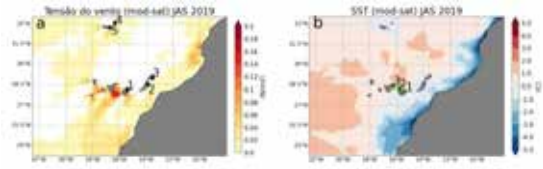


Fig. 2 Viés médio entre a tensão do vento e a SST simulada e valores de satélite às 00h. No painel de velocidade do vento a) os números 1, 2 e 3 indicam a localização das boias oceânicas de La Palma, Fuerteventura e Lazarote, respetivamente. No painel SST b) os números 1, 2 e 3 indicam a localização das boias oceânicas La Palma, Gran Canaria e Santa Cruz de Tenerife, respetivamente.

Para avaliar a precisão da SST (temperatura da superfície do mar) simulada, usamos dados de satélite da base de dados Multi-scale Ultra-high Resolution (MUR), que representa valores SST noturnos, com periodicidade diária e com 0,01º de resolução. Uma descrição desta base de dados encontra-se em Chin et al (2017). Após interpolação dos dados de satélite para a resolução do modelo, o viés de temperatura é inferior a 1 ºC na maior parte do domínio (Figura 2b), exceto em algumas regiões, predominantemente localizadas na parte SO, onde se observa uma diferença ligeiramente superior e próximo à costa de Africa onde se observa uma temperatura simulada mais baixa, com uma diferença média de 2-3ºC, o que pode não ser necessariamente devido a um erro na simulação, pois pelo menos parte deste viés pode ser devido à resolução dos sensores do satélite que não permite medir com precisão os intensos gradientes de SST junto à costa. Além disso, a elevada cobertura de nebulosa que é frequentemente observada em regiões costeiras de afloramento, em muitos dias não permite medir as SSTs próximas à costa com sensores infravermelhos, o que também reduz a precisão dos dados de satélite nesta região. No domínio a 3km, o viés médio da SST em todo o domínio é de 0,28 ºC.
Para uma validação detalhada do vento e da SST simulados junto às ilhas da Madeira e das Canárias, estas variáveis foram comparadas com dados in situ medidos por estações meteorológicas mantidas pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), e de boias meteo-oceânicas, mantido pelo Instituto Puertos del Estado. A localização das estações meteorológicas e das boias é mostradas na Figura 2, pelos pontos a negro e a verde, respetivamente. Para calcular os parâmetros estatísticos viés, erro médio absoluto (MAE) e erro médio quadrático (RMSE) foram utilizados valores in-situ e simulados às 00h, entre 1 de julho a 30 de setembro. Para os valores simulados e de satélite foi considerada a célula do domínio computacional mais próxima da localização geográfica de cada estação ou bóia. Os MAEs da SST têm valores entre 0,5 e 0,6 ºC, com valores ligeiramente inferiores aos calculados com dados de satélite SST (valor à direita na Tabela I). Os RMSEs das bóias vs modelo estão em torno de 0,7, novamente mais baixos que os RMSEs de dados de satélite.
Para vento de superfície foram calculados erros médios absolutos entre 1,46 e 2,24 $m.s^{-1}$ e erros

médios quadráticos entre 1,83 e 2,72 (Tabela II). Nota-se uma melhoria substancial nos valores de vento simulados em relação aos dados de satélite de vento (valores do lado direito), o que certamente está relacionado com a baixa resolução espacial dos dados de satélite (0,25º). Os valores estatísticos demonstram o valor acrescentado da simulação numérica em relação aos dados de satélite, pelo menos junto às ilhas da Madeira e das Canárias.

Tab. I. Estatística (Viés, Erro médio absoluto – MAE, Erro médio quadrático - RMSE) da SST simulada vs dados de boia (lado esquerdo), e versus dados de satélite (lado direito), para JAS 2019.

SST (modelo|satelite) vs boia	VIÉS	MAE	RMSE
1-Las Palmas	-0.30|0.42	0.55|0.81	0.66|0.94
2-Gran Canaria	-0.31|-0.29	0.64|0.65	0.78|0.79
3-Santa Cruz Tenerife	-0.54|+0.29	0.66|0.89	0.77|1.03

Tab. II. Estatística (Viés, Erro médio absoluto – MAE, Erro médio quadrático - RMSE) do vento simulado vs dados de boia (lado esquerdo), e versus dados de satélite (lado direito), para JAS 2019.

Vento (modelo|satelite) vs (boia|estação)	VIÉS	MAE	RMSE
1-Lazarote	-1.96|-3.03	2.24|3.05	2.72|3.38
2-Fuerteventura	-1.48|-3.46	1.71|3.46	2.19|3.77
3-Las Palmas	-1.42|-5.43	1.75|5.45	2.00|5.69
4- Porto Santo	-1.22|-1.58	1.56|1.73	1.86|1.95
5- Pto S.Lourenço	-0.79|-0.68	1.46|1.57	1.83|2.16

4. RESULTADOS E PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Para analisar a importância da orografia regional e da orientação da linha de costa na estrutura do vento costeiro, calculamos a variabilidade meridional de um índice orográfico e da orientação da linha de costa, conforme mostrado nas figuras 3a e 3b, respetivamente. O índice orográfico é simplesmente a altitude média dos 100km mais próximos à linha de costa. Entre cerca de 31,5N e 29N, o índice orográfico apresenta uma orografia costeira relativamente alta (quase 1 km), com dois picos, um a 31N e outro ligeiramente a norte de 29N, que correspondem ao limite SW da Cordilheira do Atlas. Em outras localidades a orografia costeira é bastante mais baixa (menos de 200m). A orientação da linha de costa foi calculada a cada 0,25 grau latitudinal. A orientação da linha de costa apresenta valores predominantemente entre 20N e 60N (Figura 3b), que corresponde a uma direção média NE-SW. Mas ao longo da região em estudado há um constante variação na orientação da linha de costa. A mais acentuada ocorre a norte de 30N, mais precisamente a jusante do cabo Ghir, onde numa pequena extensão observa-se uma orientação NW-SE.

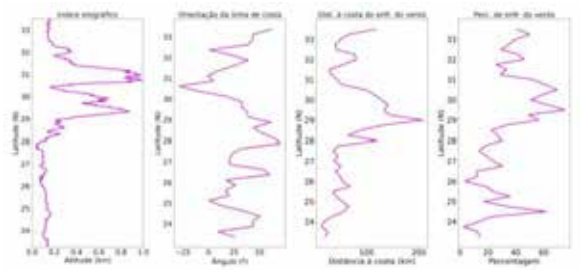


Fig. 3. a) Índice orográfico calculado como a altitude média nos 100 km próximos à linha de costa. b) Orientação da linha de costa. c)Limite offshore onde o enfraquecimento do vento é mais intenso. d) Percentagem do enfraquecimento de vento.

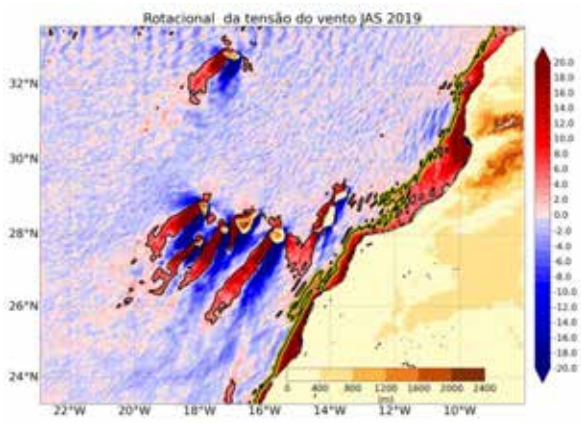


Fig. 4. Rotacional médio de tensão do vento de verão (JAS), calculado com as componentes simuladas de tensão do vento na superfície às 00h UTC. A linha amarela indica a localização da isolinha costeira $5*10^{-7}$ s^{-1}, que é usada para definir o comprimento de enfraquecimento do vento.

Seguindo uma metodologia anteriormente utilizada na costa da Califórnia por Renault et al. (2016), definimos o comprimento do enfraquecimento do vento como a distância de uma isolinha do rotacional da tensão do vento à linha de costa. A isolinha escolhida ($5*10^{-7}$ s^{-1} linha amarela na figura 4) é bastante arbitrária, mas olhando para a distribuição espacial média da tensão do vento parece definir razoavelmente bem o limite offshore onde o decréscimo na tensão do vento é mais acentuado, que se carateriza por uma faixa junto a costa com elevados valores do rotacional do vento. O comprimento do enfraquecimento do vento varia constantemente ao longo da costa com valores entre 20 km e 200 km (figura 6c), tendendo a aumentar nas regiões onde a orografia costeira aumenta, como entre 32-31N. O máximo de 200km, a 29N, coincide com o limite sul da Cordilheira do Atlas. Mas a orientação da linha de costa também tem influência na estrutura do vento junto à costa, geralmente, quando a orientação se desvia para N-NW há uma tendência para aumentar o comprimento do enfraquecimento do vento. Por exemplo, quando a orientação muda de NE para NW, a norte do paralelo 30N nota-se um aumento no comprimento de enfraquecimento. Nesta região a mudança de orientação da linha de costa parece contrabalançar o efeito orográfico. Isso justifica a ausência de redução no comprimento de

enfraquecimento entre os dois picos das montanhas do Atlas. Geralmente, quando o comprimento do enfraquecimento aumenta/diminui, a percentagem de enfraquecimento do vento também aumenta/diminui (Figura 3d). A maior percentagem de enfraquecimento do vento ocorre a cerca de 29N com um valor em torno de 70%.

Na figura 4 é também notório o efeito significativo das ilhas no rotacional da tensão do vento, que se caracteriza por dipolos positivos-negativos, junto aos flancos Oeste e Este das ilhas, respetivamente. Este efeito estende-se às camadas superficiais do oceano como mostrado nos painéis na Figura 5 que mostram os compósitos da componente meridional do vento e da temperatura potencial na atmosfera e no oceano ao longo das secções zonais a 32.5N e 31N. Os tercis superior (P66) e inferior (P33) foram calculados tendo como referência a média da Altitude Camada Limite Atmosférica (ACLA) no respetivo paralelo. A linha a branco na atmosfera representa a altitude da camada limite (altitude em que N^2-frequência de Brunt Väisälä é máxima). No oceano a linha a branco representa a profundidade da camada de mistura (PCM), calculada considerando uma diferença de 0,3 $kg.m^{-3}$ entre a densidade superficial do oceano e a densidade do oceano na profundidade da camada mistura. Tentamos usar diferentes valores, mas o valor de 0,3 fornece uma estimativa mais precisa e estável do efeito do vento de superfície nas camadas superficiais do oceano. A comparação entre os compósitos dos tercis superiores (lado direito) e inferiores (lado esquerdo) mostram uma descida acentuada (cerca de 1500m) na ACLA que impõe uma intensificação dos jatos junto às ilhas e à costa africana, por efeito de Venturi nas camadas superficiais da atmosfera, o que confirma resultados apresentados anteriormente em Miranda et al (2020) e Alves et al (2021), para a região da Madeira. Consequentemente, esta intensificação dos jatos impõe nas camadas superficiais do oceano um aumento local da profundidade das isotérmicas e de PCM. Por exemplo, a 31N, um aumento de 1-2 $m.s^{-1}$ no jato junto à costa africana impõe um aumento da PCM de 75m para 100m, o que mostra a importância da estrutura vertical das camadas da atmosfera junto à superfície do oceano na estratificação das camadas superiores do oceano.

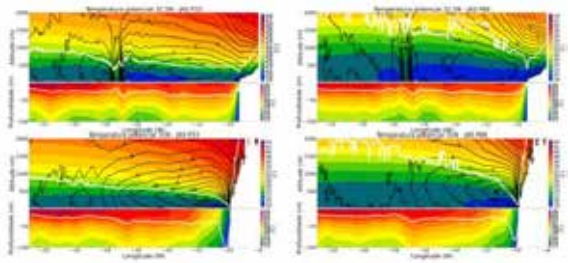


Fig. 5 Compósitos de secções zonais de temperatura potencial e vento meridional na atmosfera e temperatura potencial no oceano, nos paralelos 32.5N e 31N, tendo como referência a altura média da camada limite atmosférica no respetivo paralelo. Linha a branco na atmosfera representa a altura da camada limite e no oceano a profundidade da camada de mistura.

Agradecimentos

Os autores agradecem a cedência dos dados das estações meteorológicas ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) e dos dados das boias meteo-oceanográficas ao instituto Puertos del Estado.

REFERÊNCIAS

Alves, J.M.R., Caldeira, R.M.A., Miranda, P.M.A. (2020). Dynamics and oceanic response of the Madeira tip-jets. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society (2020). 1–16. https://doi.org/10.1002/qj.3825

Alves, J.M.R., Tomé, R., Caldeira, R.M.A. and Miranda, P.M.A. (2021). Asymmetric Ocean Response to Atmospheric Forcing in an Island Wake: A 35-Year High-Resolution Study. *Frontiers in Marine Science* 8:624392. doi: 10.3389/fmars.2021.624392

Caldeira, R.M.A., Groom, S., Miller, D. Pilgrim, P. and Nezlin, N.P. (2002) Sea-surface signatures of the island mass effect phenomena around Madeira Island, Northeast Atlantic. *Remote Sensing of Environment*, 80, 336–360. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00316-9.

Chin, T.M., Vazquez-Cuervo, J., Armstrong, E.M., (2017). A multi-scale high-resolution analysis of global sea surface temperature, Remote Sensing of Environment, Vol.200,154-169,ISSN00344257,https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.029

Grubišic´, V., Sachsperger, J. and Caldeira, R.M., (2015). Atmospheric wake of Madeira: first aerial observations and numerical simulations. Journal of the Atmospheric Sciences, 72, 4755–4776. https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0251.1.

Miranda, P. M. A., Tomé, R., Frois, L., Nogueira, M., Alves, J. M. R., Prior, V., et al. (2021). Speed-up of the Madeira tip jets in the ERA5 climate highlights the decadal variability of the Atlantic subtropics. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 147, 679–690. doi: 10.1002/qj.3940

Renault, L., Hall, A., Mcwilliams, J.C., (2016). Orographic shaping of US West Coast wind profiles during the upwelling season Climate Dynamics; Heidelberg Vol. 46, Iss. 1-2, 273-289. DOI:10.1007/s00382-015-2583-4

Samelson, R. M., O'Neill, L. W., Chelton, D. B., Skyllingstad, E. D., Barbour, P. L., & Durski, S. M. (2020). Surface Stress and Atmospheric Boundary Layer Response to Mesoscale SST Structure in Coupled Simulations of the Northern California Current System, Monthly Weather Review, 148(1), 259-287.

Warner, J.C., Perlin, N and Skyllingstad E.D., (2008) Using the Model Coupling Toolkit to couple earth system models. *Environmental Modelling & Software*, 23, 1240–1249.

Caracterização oceanográfica na região noroeste costeira de Portugal Continental associada a diferentes regimes de forçamento

C Cunha (1, 2), N Zacarias (2), L Lamas (2)

(1) Departamento de Física, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal; Cristiana.Cunha@hidrografico.com

(2) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal;

Resumo: A costa de Portugal continental está exposta a uma grande variedade de forçamentos que controlam as condições oceanográficas na coluna de água ao longo do ano. Neste trabalho, utilizaram-se dados de temperatura, salinidade e correntes, recolhidos na coluna de água, durante 4 campanhas oceanográficas entre outubro de 2018 e março de 2020 na costa noroeste de Portugal Continental, para fazer uma caracterização oceanográfica desta região em condições de Inverno e de Verão. Foram analisados também dados de forçamento, nomeadamente vento, para os períodos próximos às campanhas. Na análise preliminar dos dados referidos, verificou-se que existem diferenças significativas nos campos de salinidade e temperatura entre as campanhas realizadas. Nas campanhas de verão observam-se valores mais elevados de salinidade e de temperatura. Na campanha Fev2020 verifica-se uma pluma de água com salinidade mais baixa com origem no escoamento fluvial do rio Mondego e que se estende de sul para norte.

Palavras-chave: caracterização oceanográfica, costa noroeste, forçamento, salinidade, temperatura.

1. INTRODUÇÃO

A costa de Portugal continental está exposta a uma grande variedade de forçamentos que induzem diversos fenómenos oceânicos. Alguns desses fenómenos são o upwelling, as brisas marítimas e terrestres, bem como o transporte de plumas provenientes dos rios (Relvas *et al*., 2007).

O upwelling é um fenómeno oceânico que envolve o afloramento de águas mais frias, densas e ricas em nutrientes à superfície através da indução do vento. Em Portugal, nomeadamente no verão, os ventos são maioritariamente de Norte devido à posição do Anticiclone dos Açores, assim sendo face à teoria do transporte de Ekman o upwelling irá ocorrer na costa leste (Fiúza *et al.*, 1982).

As plumas salinas, com salinidades menores de 34,0, consistem numa massa de água no oceano costeiro com propriedades fluviais resultantes da descarga estuarina para o ambiente marinho. Normalmente as plumas estão associadas ao inverno uma vez que o caudal dos rios é maior devido a maior precipitação. Para além disso as plumas podem influenciar vários aspetos na oceanografia costeira, nomeadamente na hidrologia, biogeoquímica e o transporte de sedimentos. Na costa de Portugal continental é frequentemente observada a 'Western Iberica Buoyant Plume (WIBP)' que apresenta S<35,7, e desloca-se para o equador. A WIBP é regularmente identificada no verão. (Oliveira et al., 2019; Peliz et al., 2002)

Neste trabalho foram analisados dados de temperatura e salinidade ao longo da coluna de água e dados de corrente, recolhidos na costa Noroeste de Portugal Continental, em 4 campanhas realizadas entre outubro de 2018 e março de 2020, no âmbito do projeto AQUIMAR (Zacarias *et al.*, 2020). Foram também analisados dados de vento e de caudal do rio Mondego para discutir a sua influência nas condições oceanográficas observadas.

2. DADOS E MÉTODOS



Fig. 1 - Região de estudo (Costa Noroeste de Portugal Continental latitude 40ºN a 42ºN e longitude 10ºW a 8ºW) com a localização das áreas de estudo: Área A (sombreado vermelho) e B (sombreado amarelo), estação meteorológica (AVEIRO_M) na latitude 40,63 e na longitude -8,65, do Perfilador Acústico de Corrente (ADCP_PV) na latitude 41,40 e na longitude -8,86 e da Barragem de Açude-Ponte de Coimbra (APC_CAUDAL) latitude 40,21 e na longitude -8,44.

Neste estudo foram analisados dados oceanográficos recolhidos durante quatro campanhas oceânicas realizadas no âmbito do projeto AQUIMAR (Tabela

1). A área total abrangida pelas campanhas do projeto AQUIMAR foi dividida em 5 subáreas, A a E, cobrindo a costa de Portugal continental de norte a sul (mais informação em Zacarias et al., 2020). Este estudo foca-se nas duas subáreas mais a norte: área A, que se encontra entre a latitude 41,00 e 41,80 e a longitude -9,40 e -8,75, aproximadamente entre a Póvoa de Varzim e Espinho; e a área B, que se encontra entre a latitude 40,10 e 40,85 e a longitude -9,60 e -8,80, aproximadamente entre Aveiro e Figueira da Foz (Fig. 1.). Na Tabela 1 está representado o período das campanhas oceanográficas, sendo que para cada campanha é apresentado os dias em que os dados das áreas A e B foram recolhidos.

Tabela 1 - Período das campanhas oceanográficas

Campanha	Total	Área A	Área B
Out18	5 a 26 outubro	20 a 23 outubro	24 a 26 outubro
Abr19	13 abril a 14 maio	6 a 8 maio	2 a 6 maio
Out19	7 a 31 outubro	24 a 26 outubro	21 a 24 outubro
Fev20	24 fevereiro a 21 março	11 a 15 março	17 a 19 março

Os dados de temperatura e salinidade foram obtidos utilizando uma sonda multiparamétrica "OCEAN SEVEN 320Plus WOCE-CTD" (CTD) da marca "IDRONAUT" e foram processados e validados pela Divisão de Oceanografia do Instituto Hidrográfico.

Neste trabalho foram analisados apenas os dados de CTD para a camada superficial, e para tal foi calculada uma média utilizando os valores de temperatura e salinidade para os primeiros níveis dos perfis de CTD, até aos 8 m de profundidade.

Os dados do caudal turbinado da Barragem de Açude-Ponte Coimbra (Fig. 1) foram obtidos através do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos da Agência Portuguesa do Ambiente, e consistem em médias diárias de caudal turbinado (m^3/s).

Os dados de vento foram obtidos pela Estação Meteorológica de Aveiro (Fig. 1), e consistem em médias horárias de intensidade e direção desde 2018 a 2020. Posteriormente, calcularam-se as componentes *u* (Este-Oeste) e *v* (Norte-Sul) do vento através das equações:

$$u = -|M| \sin \Phi \quad (1)$$

$$v = -|M| \cos \Phi \quad (2)$$

Onde M é a intensidade do vento, e Φ a direção. A análise foi efetuada utilizando médias diárias dos dados de vento.

Os registos da velocidade da corrente no oceano foram obtidos por um perfilador acústico de corrente (ADCP - Acoustic Doppler Current Profiler 600kHz) colocado numa amarração fundeada à sonda de 62 metros (Fig. 1 – ADCP_PV), e onde o perfilador de corrente foi colocado a 37,1 metros de profundidade, de forma a adquirir medições da corrente na camada superficial do oceano. Foram realizados registos com intervalos de 5 min, para um total de 40 *células de profundidade,* cada uma com dimensão vertical de 1 m, estando a primeira a 2,11 m do perfilador. Os dados analisados correspondem às componentes *u* (Este-Oeste) e *v* (Norte-Sul) da corrente, após terem sido processados por um software específico do fabricante denominado *WinADCP*. Um dos passos deste processamento consiste na marcação do último *bin* válido, considerado como a superfície. Nesta análise, a profundidade foi considerada em relação a este limite. Posteriormente foi aplicado um filtro de Butterworth de passas baixas com um período de corte às 33h para retirar o sinal da maré. Este filtro foi aplicado às componentes *u* e *v* da velocidade da corrente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig. 2 estão representados os gráficos de temperatura versus salinidade para a camada superficial (média até 8 m) para as áreas A e B.

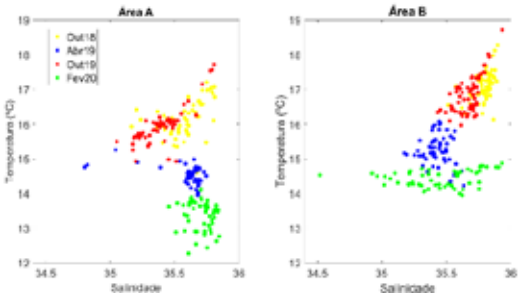


Fig. 2 - Temperatura versus Salinidade, média para os primeiros 8 m, na Área A e na Área B

Na área A e nas campanhas Abr19 e Fev20, observa-se que a camada superficial do oceano apresenta temperaturas mais baixas, variando entre 12,28 e 15,26ºC, enquanto nos meses de verão, as temperaturas são mais elevadas, variando entre 14,93 e 17,75ºC. Por outro lado, a salinidade na área A apresenta variações nas várias campanhas, sendo possível observar que na campanha Abr19 a salinidade varia entre 34,80 e 35,75. Já as campanhas Out18 e Out19 apresentam uma salinidade entre 35,00 e 35,81. Por fim, a campanha Fev20 apresenta valores de salinidade superiores a 35,45.

Na área B, é possível observar que durante as campanhas Out18 e Out19 se registaram os valores mais elevados de temperatura (18,28ºC e 18,72ºC, respetivamente) como também valores de salinidade superiores a 35,50 quando comparados com as restantes campanhas em que os valores são inferiores. Por outro lado, Fev20 é a campanha que apresenta

valores mais baixos de temperatura, entre 13,95 e 14,87ºC, e maior amplitude de valores de salinidade, sendo o mínimo registado de 34,52 e o máximo de 35,93. Já Abr19 apresenta uma maior variação na temperatura superficial e os valores de salinidade encontram-se entre os 35,17 e os 35,63.

Na campanha Fev20 na área B observa-se uma maior variação de salinidade quando comparada com as restantes campanhas e até mesmo com a área A. Nas Fig. 3 e 4 está representada a distribuição horizontal de ambas as áreas A e B na campanha Fev20.

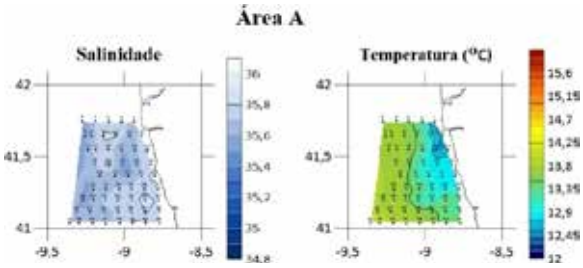


Fig. 3 - Distribuição horizontal da salinidade (esquerda) e da temperatura (direita) média à superfície [0 - 8 m] para a área A

Ao analisar a distribuição horizontal de salinidade na campanha Fev20 (Fig. 3) é possível identificar águas mais salinas, valores superiores a 35,8, na zona norte e SE da área A, sendo ainda possível identificar uma língua de águas menos salinas, inferiores a 35,5, proveniente de SO. Em relação à distribuição horizontal de temperatura, as águas são mais frias, com valores entre os 12,0 e 13,0ºC, junto à costa. Já ao largo podemos observar temperaturas mais elevadas, com valores entre 13,5ºC a 14,1ºC.

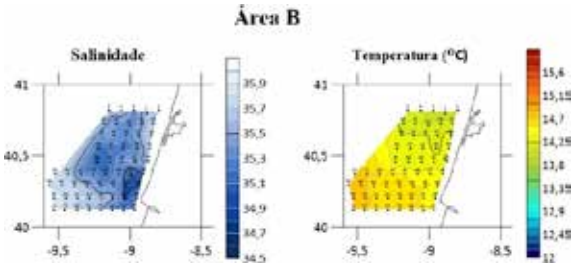


Fig. 4 - Distribuição horizontal da salinidade (esquerda) e da temperatura (direita) média à superfície [0 – 8 m] para a área B

Na distribuição horizontal da salinidade à superfície para a área B (Fig. 4), consegue-se identificar uma região com valores mínimos de salinidade à superfície, valores entre 34,5 e 35,0. Os valores menores de salinidade encontram-se nas estações mais próximas da costa, ao largo da Figueira da Foz e observa-se uma região com valores menores de salinidade que se estende para NO. Na distribuição horizontal da temperatura observa-se um gradiente N-S, com águas mais frias provenientes da região Norte da área B, registando-se valores 13,8ºC e 14,7ºC.

O comportamento da salinidade na área B na campanha Fev20 onde se observa uma maior dispersão nos valores, levou a que fosse realizada uma análise mais detalhada nessa área e para esse período. Assim, foram analisados, um conjunto de dados de vento provenientes da estação meteorológica de Aveiro e dados do caudal turbinado na barragem Açude-Ponte de Coimbra no rio Mondego, nos meses anteriores e durante a campanha. Também foram analisados dados de corrente obtidos pelo ADCP fundeado durante a campanha Fev20.

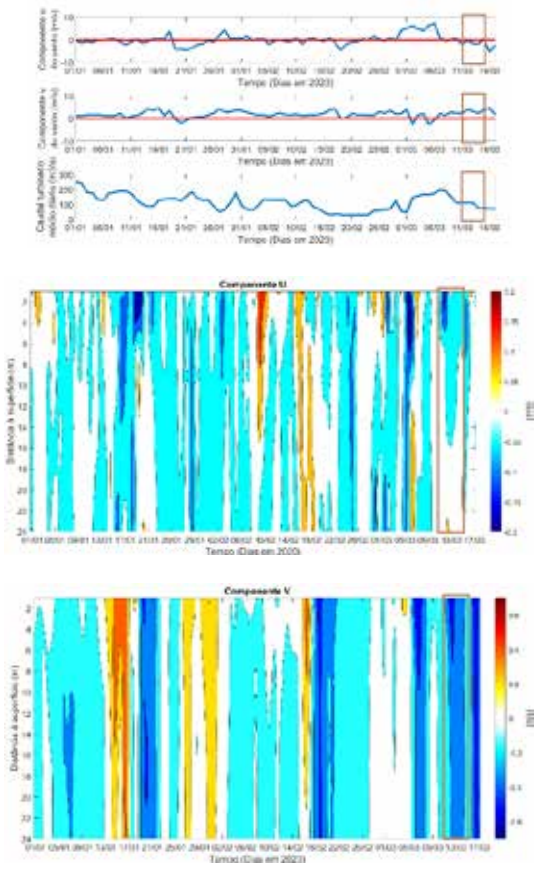


Fig. 5 - Componente u (a) e v (b) do Vento e Caudal Turbinado (c) na Barragem de Açude- Ponte de Coimbra. Componente u (d) e v (e) da corrente, ao longo da coluna de água, referenciadas à distância à superfície (último bin considerado válido). A linha a preto corresponde à velocidade igual a 0. Valores positivos indicam corrente para Este (d) e Norte (e). O retângulo laranja realça o período em que ocorreu a campanha Fev20.

Analisando a Fig. 5, é possível verificar que a componente *u* do vento, que corresponde à direção Este – Oeste, apresenta, em geral, fraca intensidade, excetuando dois eventos com vento mais intenso de Este entre 18 e 26 de janeiro e vento de Oeste entre 27 fevereiro e 7 de março, com intensidade próxima dos 10 m/s. Durante a campanha, o vento apresentava uma componente de Este de intensidade fraca (inferior a 2 m/s). A componente *v* do vento indica que, ao longo dos três meses, a intensidade do vento não ultrapassou os 5 m/s e o vento apresentava uma componente no geral de sul. Durante a campanha Fev20, a componente *v* do vento é positiva (de sul) com intensidades próximas dos 5 m/s.

Nos dados do caudal turbinado para os meses de janeiro a março de 2020 (Fig. 5) é possível ver que

durante os três meses o caudal turbinado apresenta valores entre os 30 e os 250 m^3/s, sendo que em janeiro registam-se valores de caudal turbinado mais intensos, em fevereiro os valores do caudal são mais baixos havendo uma leve subida dos valores em março. Na semana anterior à campanha é possível observar que os valores do caudal eram superiores a 100 m^3/s, não se verificando o mesmo para o período da campanha Abr19.

Analisando a Fig. 5d), verifica-se que, para o período em questão, de janeiro a março de 2020, a componente *u* é, em geral, negativa, indicativo de corrente com componente para oeste, e com maior intensidade à superfície. Durante a campanha Fev20, a componente *u* é negativa e mais intensa à superfície, indicando que, durante este período, a corrente apresentava uma componente para oeste. Em relação ao componente *v* da corrente ao longo da coluna de água (Fig. 5), verificam-se eventos com valores positivos (corrente com componente para norte) e valores negativos (corrente com componente para sul). Durante a campanha Fev20 observa-se que a componente *v* da velocidade da corrente ao longo da coluna de água é negativa, com intensificação à superfície, indicando que a corrente, apresenta uma componente forte para norte.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho é elaborar uma caracterização oceanográfica na região noroeste costeira de Portugal Continental através de dados recolhidos durante 4 campanhas oceanográficas.

Em geral, a área A apresenta temperaturas mais frias quando comparadas com a área B. Quanto à salinidade nas campanhas Abr19 e Fev20 a área A é mais salina, enquanto que nas campanhas Out18 e Out19 verificamos que a salinidade apresenta valores mais elevados na área B quando comparados com as restantes campanhas. Contudo observaram-se valores de salinidade mais baixos, na camada superficial, em Fev20 em relação às restantes campanhas. A partir daí foi analisado um conjunto de dados para perceber se esse mínimo de salinidade tem origem fluvial. Nos mapas de distribuição da salinidade na área B verifica-se uma pluma de água menos salina que se encontra junto à costa e se estende para NO. Esta pluma não tem assinatura próximo da Ria de Aveiro, descartando-se assim que seja a Ria de Aveiro a origem da pluma.

O rio mais próximo da região onde se observa o mínimo de salinidade é o rio Mondego. Nos dados do caudal medido no Açude-Ponte de Coimbra comparando com o ano anterior verificou-se que o caudal turbinado médio diário era mais elevado em relação ao ano anterior.

Na análise dos dados de vento concluiu-se que nos dias de campanha os ventos sopram de SE, e através dos dados de ADCP verifica-se que a corrente se faz sentir para NO com intensificação à superfície, o que leva a supor que uma pluma do rio Mondego seria transportada para NO, o que teria uma assinatura similar à pluma observada nos mapas de distribuição de salinidade.

Na região de estudo várias plumas foram observadas em trabalhos como o Oliveira et al. (2019) e Peliz et al. (2002). No entanto, tanto no caso de Oliveira et al. (2019) como em Peliz et al, (2002) a pluma referida está associada a um evento de upwelling e apresenta valores de salinidade inferiores a 35,7.

Num trabalho futuro pretende-se analisar e comparar os dados das restantes campanhas de modo a obter uma caracterização oceanográfica na região noroeste costeira de Portugal Continental.

Agradecimentos

Este trabalho é parte integrante da dissertação de mestrado em Ciências do Mar e da Atmosfera de Cristiana Cunha, aluna da Universidade de Aveiro, a estagiar no Instituto Hidrográfico.

Os dados CTD e de corrente analisados neste trabalho foram recolhidos no âmbito do projeto AQUIMAR - Conhecimento Marinho de Apoio à Aquicultura (MAR-02.01.01-FEAMP-0107), financiado pelo Programa Operacional Mar2020. Os dados de vento foram cedidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Os dados de caudal turbinado são disponibilizados gratuitamente através do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos da Agência Portuguesa do Ambiente, www.snirh.apambiente.pt

REFERÊNCIAS

Fiúza, A. F. de G., Macedo, M. E. De, & Guerreiro, M. R. (1982). Climatological space and time variation of the Portuguese coastal upwelling. *Oceanologica Acta*, *5*, 10.

Oliveira, P. B., Amorim, F. N., Dubert, J., Nolasco, R., & Moita, T. (2019). Phytoplankton distribution and physical processes off NW Iberia during two consecutive upwelling seasons. *Continental Shelf Research*, *190*(August 2018), 103987. https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.103987

Peliz, Á., Rosa, T. L., Santos, A. M. P., & Pissarra, J. L. (2002). Fronts, jets, and counter-flows in the Western Iberian upwelling system. *Journal of Marine Systems*, *35*(1–2), 61–77. https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00076-3

Zacarias, N., Mateus, A., Esteves, R., & Lamas, L. (2020). *CARACTERIZAÇÃO OCEANOGRÁFICA DAS ÁREAS DE ESTUDO DO PROJETO AQUIMAR*.

Avaliação da qualidade dos produtos de temperatura de superfície do mar ESA SST CCI para a região costeira de Portugal, utilizando 30 anos de dados *in situ*

A. Nunes (1, 2), L. Lamas (2), S. Plecha (1), I. Martins (2)

(1) Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, andre.nunes@hidrografico.pt

(2) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas 49 1249-093 Lisboa, Portugal

Resumo: O estudo da temperatura da superfície do mar (SST) é essencial, uma vez que se trata de um parâmetro fundamental para a compreensão de muitos processos físicos no oceano, assim como na interação deste com a atmosfera. Estudos com períodos temporais extensos permitem também perceber melhor a componente oceânica do sistema climático. Neste estudo apresenta-se uma avaliação da qualidade de um produto climático derivado de dados de deteção remota, denominado "ESA SST CCI", através da comparação com dados *in situ*, recolhidos por 14 boias costeiras da ZEE de Portugal, com vista a avaliar a capacidade do produto em captar a variabilidade temporal e espacial da SST, de acordo com diversos regimes de vento. Será apresentada a análise estatística entre as duas bases de dados, mostrando a sua concordância para diferentes regimes de vento, assim como a tendência climática observada nos últimos 30 anos, para a região de estudo.

Palavras-chave: dados *in-situ*, deteção remota, SST, variabilidade, vento.

1. INTRODUÇÃO

Portugal é um país com uma extensa ZEE (Zona Económica Exclusiva), sendo bastante importante a monitorização e observação sistemática das condições oceanográficas. Um dos parâmetros de extrema importância a analisar é a temperatura da superfície do mar, que foi um dos primeiros parâmetros a ser observado *in situ* de forma sistemática, através de sensores instalados em plataformas fixas, nomeadamente boias. (Merchant et al, 2019). Por um lado, estes pontos fixos de observação são cruciais para a monitorização sistemática das condições oceânicas, possibilitando a criação de séries temporais longas e consequentemente a análise de tendências e da variabilidade sazonal e interanual. Contudo, uma vez que correspondem a observações num ponto geográfico, a análise da variabilidade espacial dos respetivos parâmetros oceanográficos é limitada. Por outro lado, nas décadas mais recentes, as observações por satélite, no caso particular da temperatura da superfície do mar, permitem uma cobertura espacial considerável, através de missões que garantem um período de revisitação relativamente curto. No entanto, a sua capacidade em captar estruturas de menor escala ainda é limitada, dada a resolução espacial destas observações ser na ordem do km. A observação da temperatura da superfície do oceano por satélite teve a sua génese nos finais dos anos 70 do século XX (Merchant et al, 2019) e desde então tem sido consistentemente mantida. Essa observação sistemática permitiu a criação de produtos climáticos de SST, com cobertura global, um dos quais será avaliado neste estudo. Torna-se então essencial a comparação e validação dos produtos de Deteção Remota de SST com as medições in-situ, para avaliar a qualidade destes mesmos produtos em captar a variabilidade temporal e espacial da SST. Esta análise é principalmente importante em regiões costeiras, onde processos de menor escala são dominantes, podendo, eventualmente, não ser captados pelas observações por satélite. O desafio em comparar medições de SST obtidas por diferentes metodologias, rege-se pelo facto do conceito de SST não ser trivial. Dependendo do método utilizado, a SST pode ser a medição da temperatura a micrómetros de profundidade, como é o caso de observações realizadas por sensores de infravermelho a bordo de satélite, tal como ao primeiro metro de profundidade, que é o caso de medições feitas in-situ (Donlon et al., 2002). Estas diferenças terão de ser levadas em conta na análise comparativa entre as duas bases de dados. O objetivo deste trabalho é a avaliação da qualidade do produto climático ESA Sea Surface Temperature Climate Change Initiative: Level 4 Analysis version 2.1" (ESA SST CCI, Good et al., 2019, Merchant et al., 2019) através da comparação com 30 anos de dados in-situ medidos por sensores instalados nas boias do sistema MONIZEE, na continuação do trabalho desenvolvido por Lamas et al., (2019). Esta validação irá permitir avaliar se o produto climático ESA SST CCI consegue captar a variabilidade temporal e espacial da SST ao longo da ZEE de Portugal. Neste trabalho serão apresentados os resultados preliminares da comparação entre o produto climático e 20 anos de dados in-situ registados pela bóia de Leixões Costeira e Leixões Oceânica.

2. DADOS E MÉTODOS

O produto ESA SST CCI fornece médias diárias SST, referenciadas a uma profundidade de 0.2 m, para o período entre setembro de 1981 e dezembro de 2016, com cobertura global numa malha de resolução de 0.05º (Good et al, 2019, Merchant et al, 2019).

Para a análise da qualidade do produto, são utilizados dados in-situ obtidos pela rede de boias do sistema MONIZEE, que é o sistema de monitorização em tempo real do oceano costeiro ao largo de Portugal, implementado e operado pelo Instituto Hidrográfico. A rede de boias MONIZEE tem, atualmente, 14 boias: 8 boias localizadas ao longo da costa de Portugal continental (Fig. 1), e 6 boias fundeadas nos Açores e na Madeira.

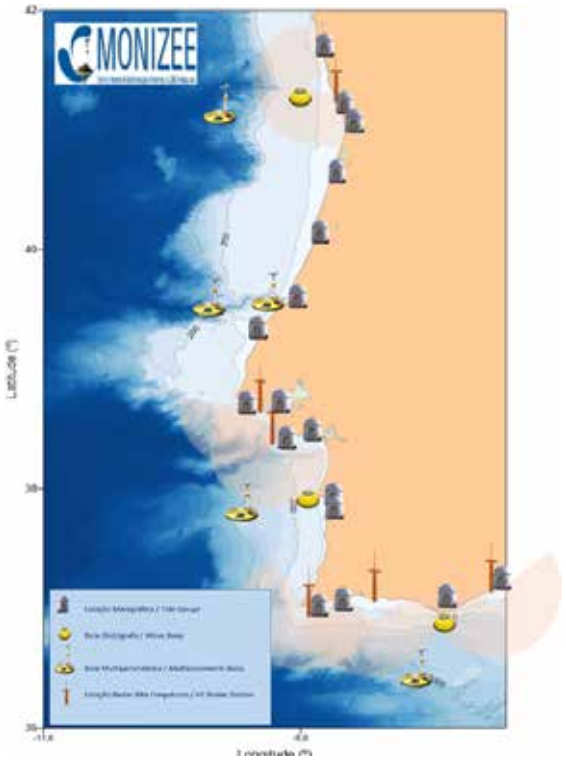


Fig. 1. Sistema MONIZEE para Portugal Continental. Encontram-se assinaladas as estações maregráficas, as boias ondógrafo (Datawell Waverider), as boias meteo-oceanográficas (Fugro Wavescan) assim como as estações de-radar HF, conforme legenda.

Para este estudo, de entre as 8 boias localizadas em ao largo de Portugal Continental, selecionaram-se 2: a Bóia Leixões Costeira, localizada a 41º 08.92' N; 009º 34.90' W, a uma profundidade de 83 m, com dados disponíveis entre 1998 e 2020 e a Bóia Leixões Oceânica, localizada a 41º19.00'N; 08º59.00'W, a uma profundidade de 1622 m, com dados disponíveis entre 2010 e 2020. Atualmente existem dois tipos de boias no sistema MONIZEE: boias ondógrafo (Datawell Waverider) e boias meteo-oceanográficas (Fugro Wavescan). As boias Datawell Waverider registam os valores de SST a cada 30 minutos através dos sensores internos de temperatura localizados a 0,7 m de profundidade, enquanto que as boias meteo-oceanográficas Fugro-Wavescan adquirem dados horários de SST, através dos sensores localizados a 1 m de profundidade. Estas boias registam também dados de vento (azimute, rajada e velocidade), o que irá permitir relacionar a qualidade do produto ESA SST CCI com diferentes regimes de vento. A média diária de cada uma das boias foi calculada através da média aritmética entre os valores válidos de SST para um mesmo dia. Para a criação de uma base de dados de *match-up* entre os dois produtos, foi aplicada a metodologia do vizinho mais próximo (*nearest neighbour*) utilizando, como indicador, a menor distância geográfica, para extrair do produto ESA SST CCI os dados do ponto geográfico equivalente. A base de dados de *match-up* resultante corresponde, para cada elemento, *n*, e passo de tempo, *i*, (diário), um valor SST_CCI (do produto ESA SST CCI) a um valor SST_Bóia (da bóia de Leixões Costeira). Para a bóia de Leixões Oceânica foi aplicada a mesma metodologia para obter a base de dados de *match-up*. Para a análise estatística, não foram considerados os períodos sem dados.

Foram analisados vários parâmetros estatísticos entre os quais o viés, através da equação:

$$\text{Viés} = \frac{\sum(\text{SST}_{\text{CCI}}i - \text{SST}_{\text{Bóia}}i)}{\text{n}}$$

Foi calculado também o coeficiente de determinação (R^2):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(SST_{CCI}i - SST_{Bóia}i)^2}{\sum(SST_{CCI}i - \overline{SST_{CCI}i})^2}$$

E o erro quadrático médio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(SST_{CCI}i - SST_{Bóia}i)^2}{n}}$$

3. RESULTADOS

Como exemplo, apresenta-se na figura 2, um mapa de SST para o dia 31/08/1998 onde se identificam águas mais frias junto à costa ocidental da Península Ibérica, característico do afloramento costeiro forçado pelo vento predominante de Norte, que ocorre nos meses de Verão na costa oeste de Portugal. (Relvas et al., 2007).

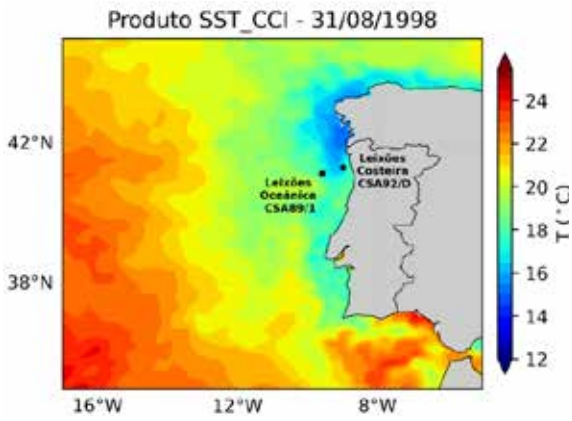


Fig. 2. Localização das boias deste estudo, sobreposta ao mapa de SST proveniente do produto ESA SST CCI do dia 31/08/1998.

3.1 Resultado da Boia Leixões Costeira

Uma vez que o período disponível de dados do produto ESA SST CCI se estende até 2016, são apresentadas as séries temporais na figura 3, para o

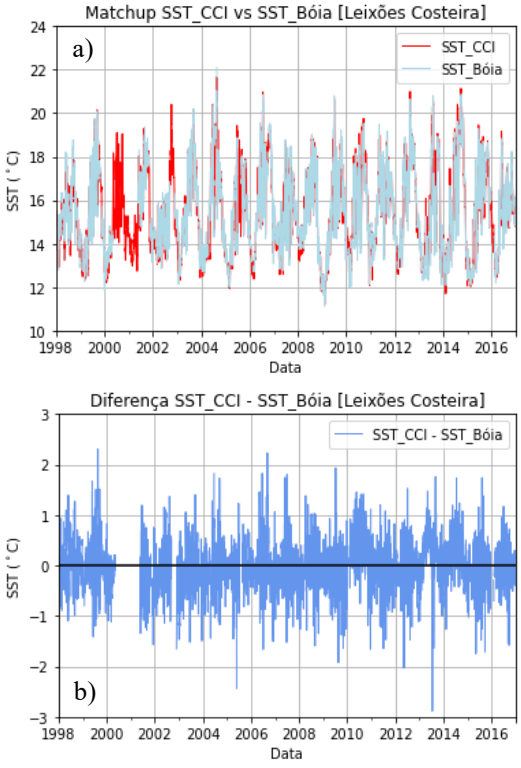


Fig. 3. Série temporal dos dados diários de SST Bóia e SST_CCI (a), e das diferenças relativas diárias entre as duas medições (b), para a boia Leixões Costeira.

período entre 1998 e 2016. Observa-se a existência de variabilidade sazonal bem definida da SST, tanto para os valores obtidos pela boia, como pelo produto. É, no entanto, notório que os valores dos mínimos e dos máximos de SST medidos pelo produto têm tendência a ter picos mais pronunciados, dentro desta mesma variabilidade sazonal (figura 3a). Existem algumas falhas nos dados medidos pela bóia, sendo realçado também na figura 3a um período mais longo entre os anos de 2000 e 2001. Outras falhas esporádicas ocorreram também nos anos de 2010, 2015 e 2016. Já a figura 3b mostra as diferenças de temperatura, através da subtração dos valores de SST do produto pela SST da bóia. É visível um período no qual não temos dados da bóia, em parte dos anos 2000 e 2001. De modo geral, verifica-se que a maioria das diferenças diárias se encontra entre -1 e 1ºC, uma vez que cerca de 96% das mesmas se encontram neste intervalo.

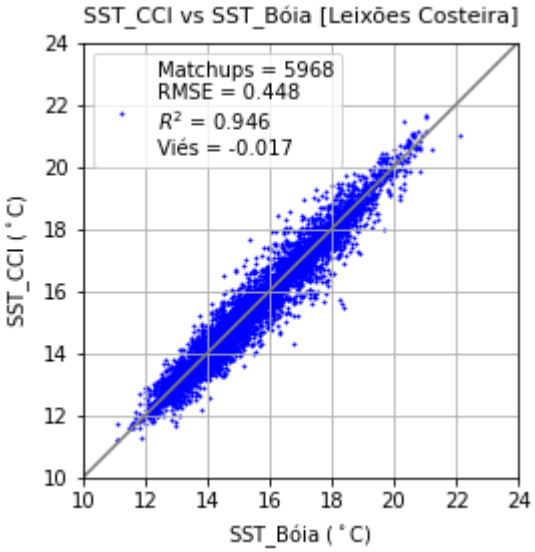


Fig. 4. Diagrama de dispersão para os valores de SST da Bóia Leixões Costeira e estatísticas associadas. A linha cinzenta marca o x=y.

As duas séries temporais apresentam um coeficiente de determinação (R^2) de 0.946, para um p-value de 0.000, e RMSE de 0.5ºC, e um Viés de -0.017ºC (figura 4). Isto significa que a SST do produto climático é negativamente enviesada, tendendo a subestimar o valor real da SST, o que parece estar de acordo com Binner (2019). Esta subestimação é, no entanto, relativamente pequena, não deixando de mostrar que existe uma boa correspondência entre a SST medida pela bóia e a SST do produto ESA SST CCI. O valor do RMSE de 0.5ºC encontra-se, no entanto acima do valor esperado de 0.1ºC, indicado por Merchant et al (2019) como sendo o valor expectável caso o produto seja confrontado com medições *in situ*. Comparado com os resultados de estudos semelhantes, vemos que estão de acordo com Lamas et al (2019), onde as diferenças se situam entre 0.3 e 0.8ºC. As diferenças encontradas por Binner (2019) são na sua maioria ligeiramente inferiores, na ordem dos 0.2 a 0.3ºC. O trabalho futuro inclui elaborar uma análise sazonal das diferenças, o que permitirá aferir a influência dos fatores sazonais do produto ESA SST CCI adicionando conhecimento sobre as suas limitações.

3.2 Resultados preliminares para a bóia Leixões Oceânica

De maneira análoga ao estudo efetuado para a bóia Leixões Costeira (secção 3.1), foi representada a série temporal dos registos de SST medidos pela bóia Leixões Oceânica e dos dados de SST do produto ESA SST CCI (figura 5). Assim como para a bóia Leixões Oceânica, as duas séries temporais demonstram uma variabilidade e magnitude semelhantes ao longo do período de estudo. No futuro, a análise do produto climático na localização correspondente à bóia Leixões Oceânica será sustentada também pelos dados de vento disponíveis, que permitirão avaliar a qualidade do produto para diversos regimes de vento.

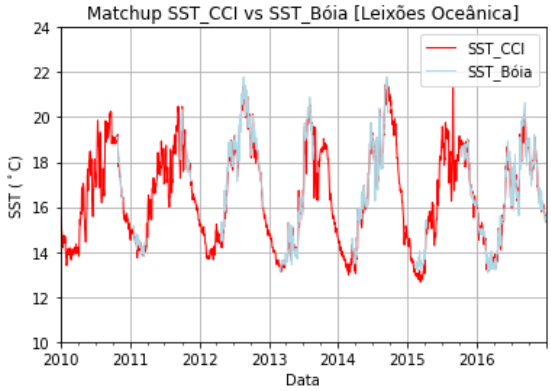


Fig. 5. Série temporal de matchups para a Bóia Leixões Oceânica.

4. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho realizado tem como objetivo avaliar a qualidade do produto ESA SST CCI na ZEE de Portugal, através da comparação com dados das boias do sistema MONIZEE. Neste estudo, foram utilizados dados de 2 boias: a bóia Leixões Costeira e da bóia Leixões Oceânica, localizadas na costa Noroeste de Portugal Continental. Foi feita a análise da correlação entre as duas bases de dados, e os resultados demonstraram uma boa correlação (R^2 de 0. 946), com diferenças médias de cerca de 0.5 º C para um viés de -0.017. Como trabalho futuro, pretende-se estender os resultados para as restantes boias do sistema MONIZEE, de forma a aferir as principais diferenças entre os valores de SST do produto climático ESA SST CCI e registos in-situ para a ZEE de Portugal. As boias meteo-oceanográficas, por terem acoplado um anemómetro, irão permitir também a relação entre as diferenças de SST e a velocidade de vento. Resultados preliminares para a bóia Leixões Oceânica, parecem apontar na direção prevista (Donlon et al., 2002), de que existe uma menor diferença entre as duas bases de dados de SST para maiores velocidades do vento; uma análise mais detalhada, através de uma validação quantitativa está neste momento a ser realizada.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do serviço prestado pelo IH como *beta-tester* do produto ESA SST CCI. Os dados das boias Leixões Costeira e Leixões Oceânica, do sistema MONIZEE, são geridos e processados pela divisão de Oceanografia do IH. Este trabalho é parte integrante da dissertação de mestrado do André Nunes, aluno do mestrado em Ciências Geofísicas da FCUL, a estagiar no IH.

REFERÊNCIAS

Binner, H. (2018). *Assessment of the utility of the ESA SST CCI product for environmental research using data from meteorological buoys in the North Atlantic.* [Master's Thesis, University College Cork]. https://zenodo.org/record/1450367

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), 353-36. DOI:10.1175/15200442(2002)015<0353:TIVOSS>2.0.CO;2

Good, S.A., Embury, O., Bulgin, C.E., Mittaz, J., (2019): ESA Sea Surface Temperature Climate Change Initiative (SST_cci): Level 4 Analysis Climate Data Record, version 2.1. Centre for Environmental Data Analysis, 22 August 2019 DOI:10.5285/62c0f97b1eac4e0197a674870afe1ee6

Lamas, L., Esteves, R., Almeida, S., de Azevedo, E., Correia, C., Reis, F., (2019). Feedback from the ESA SST CCI v2.0 product over the Eastern Atlantic

Merchant, C.J., Embury, O., Bulgin, C.E., Block, T., Corlett G. K., Fiedler E., Good, S., Mittaz, J., Rayner, N. A., Berry, D., Eastwood, S., Taylor, M., Tsushima, Y., Waterfall A., Wilson, R., Donlon, C., (2019). Satellite-based time-series of sea-surface temperature since 1981 for climate applications. *Sci Data* **6,** 223. DOI: 10.1038/s41597-019-0236-x

Relvas, P., Barton, E.D., Dubert, J., Oliveira, P. B., Peliz, A., da Silva, J. C. B., Santos, A. Miguel P. (2007). Physical oceanography of the western Iberia ecosystem: Latest views and challenges, Progress in Oceanography, Volume 74, Issues 2–3, 149-173 DOI: 10.1016/j.pocean.2007.04.021

MSFD monitoring of water quality off Spain and Portugal using in situ and satellite retrievals

V. Brotas (1), M. Angélico (2), S. Groom (3), A. Tracana (1), P. Nunes (2), S. Pardo (3), P. Oliveira (2)

(1) MARE/FCUL - Centro de Ciências do Mar e do Ambiente, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Portugal. vbrotas@fc.ul.pt;
(2) IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Algés, Portugal;

(3) RSG/PML - Remote Sensing Group, Plymouth Marine Laboratory, Plymouth, UK

Resumo: In order to respond to Marine Strategy Framework Directive (MSFD) requirements, collaboration between national and international institutions is crucial. This study presents work which combines in situ and remote sensing approaches, documenting the spatial and seasonal variability patterns of the phytoplankton biomass off W Iberia. A total of three campaigns, two in 2019 (winter and spring) and one in 2020 (early spring), were performed during the fisheries monitoring surveys carried out by the Portuguese Institute for the Ocean and Atmosphere (IPMA) in the frame of the European Union Data Collection Framework (DCF). Samples were collected for the analysis of pigments by HPLC. Validation of several satellite products are presented and discussed.

Palavras-chave: iberian coast, MSFD, ocean colour, phytoplankton.

1. INTRODUCTION

Portugal and Spain, as other EU countries, have a requirement to monitor the status of coastal and offshore water quality for the Marine Strategy Framework Directive (MSFD). Offshore sampling is very costly due to the need to access large vessels and the Atlantic Area Interreg iFADO (Innovation in the Framework of the Atlantic Deep Ocean) project is investigating the opportunistic use of research vessel surveys to obtain in situ data as well as simultaneous satellite observations of water quality.

This article, aiming to validate satellite products to assess phytoplankton biomass off Iberia coast, reports on three campaigns, carried out off the Spanish and Portuguese coasts, in 2019 and 2020. Measurements of phytoplankton pigments, including the ubiquitous chlorophyll-a used as a proxy for phytoplankton abundance, were used to test a number of satellite processing algorithms for remote sensing retrieval of chl-a.

2. DATA AND METHODS

The campaigns used to collect in situ data took place in 2019 (winter and spring) along all Portuguese coast and South Spain, and in 2020 (early spring) along the Algarve and south Spain; these campaigns were performed in the context of the fisheries monitoring programme carried out regularly by the Portuguese Institute for the Ocean and Atmosphere (IPMA), see Fig. 1.

Samples were collected for the analysis of pigments by HPLC. A volume of 1-2L, of surface water, was vacuum-filtered through Whatman GF/F, 25mm diameter filters. Samples were stored at -20ºC during the campaigns, and later kept at -80ºC until analysis.

Samples were processed using a Shimadzu Prominence – I Plus® Lc 2030C 3D Plus, with a monomeric octysilica (OS) C8 column Symmetry® (150mmx4.6mm dimensions, 100 Å pore size, 3.5 µm particle size, 337m^2 g^{-1} surface area and 12.27% carbon load). The chromatographic separation of pigments is based on the C8 method described in

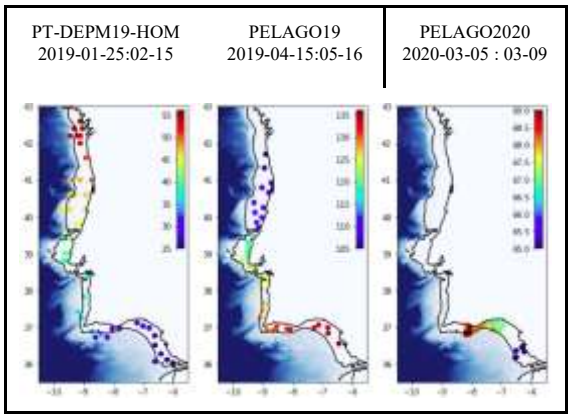


Fig. 1. Spatial and temporal distribution of the HPLC samples collected during the three surveys . Sample locations are coloured according to "day-of-the-year" (25: 25Jan, 135: 15May.

Cartaxana et al. (2012). Pigments were extracted with 3 ml of 95% cold-buffered methanol (2% ammonium acetate) in a polypropylene test tube. An internal standard, trans-β-apo-8'-carotenal at a concentration of 0.005 mg L-1 is included in the extraction solvent, for posterior correction of pigment concentrations. Pigments are identified from absorbance spectra and retention times in the photodiode array detector, and

concentrations calculated using standards from (Danish Hydraulic Institut) DHI.

The version 5 Chla product of the ESA Ocean Colour Climate Change Initiative, with a resolution of 1km, was used to produce a cruise average of the Chla spatial distribution during the period of the two cruises which covered the Portuguese coast. For the Pelagos20 cruise (2020, South coast), OLCI from Sentinel 3 was processed with the Polymer atmospheric correction and the in-built Chla retrieval used.

Satellite Chla derived from NOAA-20 VIIRS were validated using data from the cruises. Remote sensing reflectances (Rrs) were obtained from overpasses covering the sampling locations within ±3 hours from in situ time acquisition. A range of chlorophyll algorithms were applied: OC3 (O'Reilly et al., 2000); OC5 (Gohin et al., 2002); OCI, an algorithm that combines CI (Hu et al., 2012) and OC3 for low/high Chla (Chla > 0.1 mg m-3); and OC5CI, an algorithm that combines OCI and OC5 for low/high Chla (Chla > 0.15 mg m^{-3}).

Satellite data were masked using the level 2 flags recommended for validation by NASA. Matchups were calculated by extracting the 3x3 pixel box centred in the coordinates of the in situ observation. Same-pixel in situ data were averaged to guarantee matchup independence. Matchups were excluded if the median coefficient of variation (CV) of the Rrs over the 3x3 box was higher than threshold (0.15 for the initial analysis) and if <50% of pixels were present in the 3x3 box. The following statistical metrics were used to evaluate algorithm performance: type-II regression slope (S), intercept (I), Pearson correlation coefficient (r), root-mean-square difference (RMSD - Ψ), bias (δ), bias-corrected root-mean-square error (Δ), and relative percentage difference (RPD) which was computed with modulus all computed in log10 space.

The relative contribution of the three phytoplankton size classes to the total Chla was estimated with the diagnostic pigment concentration following Uitz et al. (2006), where microplankton corresponds to cells with a diameter > 20 µm, nanoplankton, between 2 and 20 µm, and picoplankton lower than 2 µm .

3. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 2 shows the Chla results from ESA Ocean Colour remote sensing and in situ, for Spring 2019. The general pattern between the two approaches agrees. Results evidence the differences along the coast. Higher Chla values coinciding with the dominance of microplankton (constituted by diatoms and dinoflagellates) were registered from Peniche to Cabo da Roca and in front of Douro river, probably due to upwelling and river influence, respectively (Fig. 3). The region south of Lisbon to Cape S. Vincent showed lower Chla values, where phytoplankton communities are mostly constituted by smaller cells of nanoplankton and picoplankton.

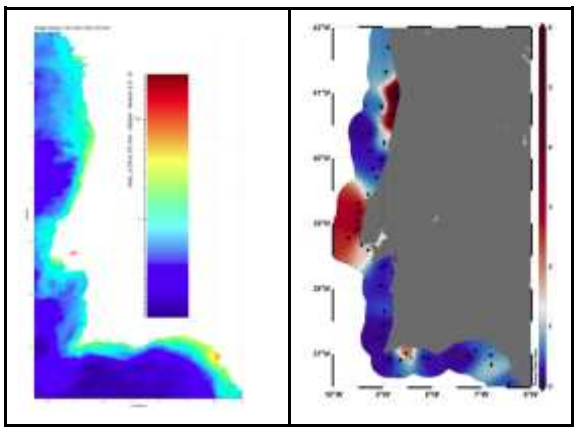


Fig. 2. Cruise average remote sensing Chla and in situ Chla for Spring 2019.

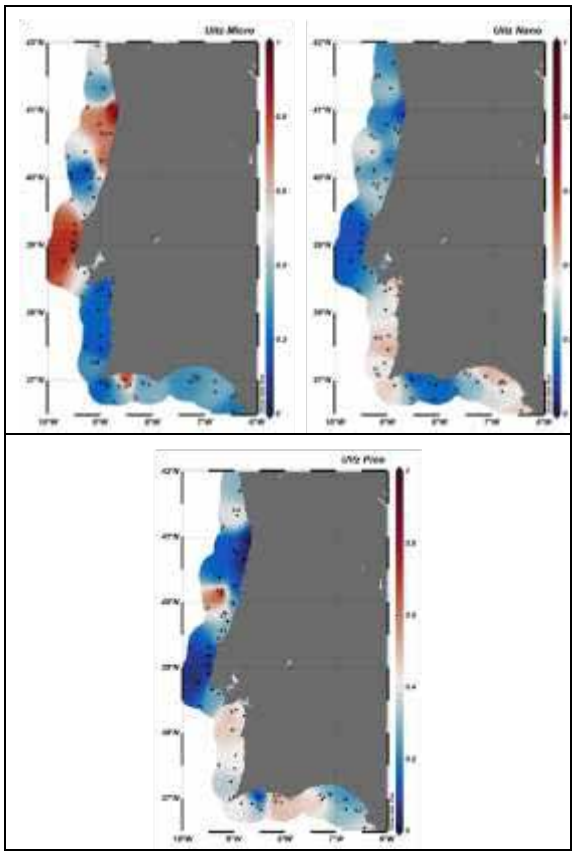


Fig. 3. Phytoplankton Size classes relative abundance in Spring 2019.

There were 10 clear NOAA-20 VIIRS satellite images coincident with the in situ data providing 27 matchups. Fig. 4 shows good performance in the retrieval of Chla from NOAA-20 VIIRS.

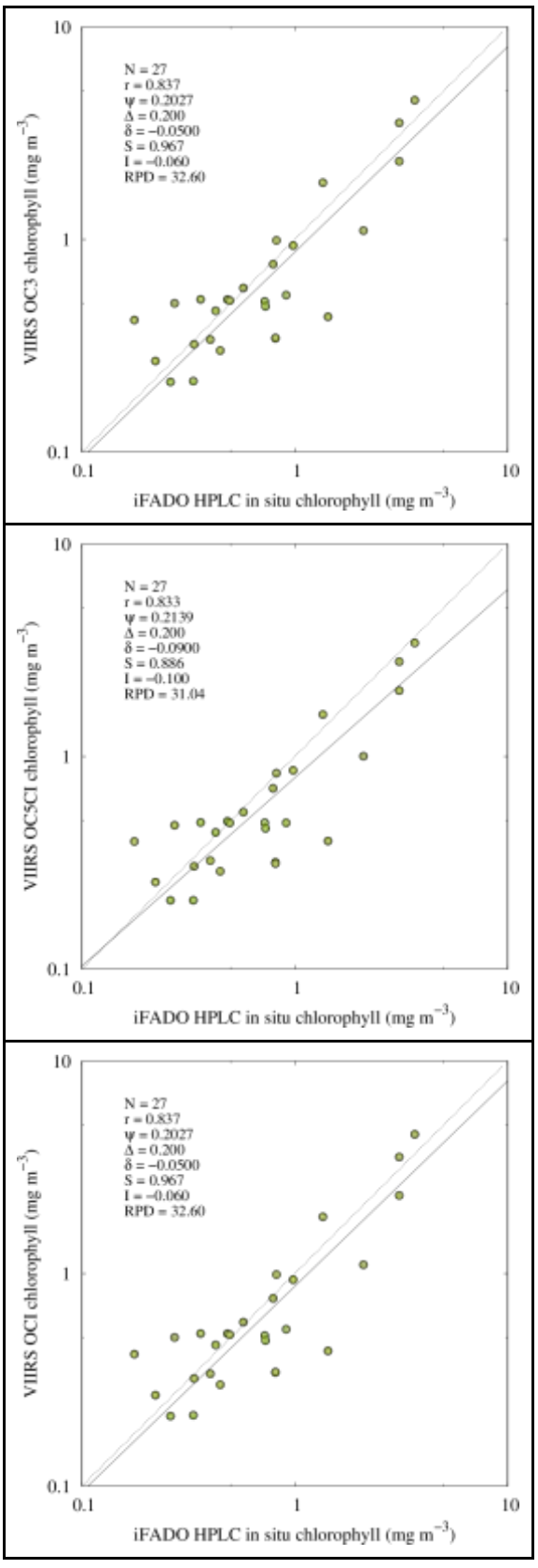


Fig. 4. Validation of NOAA 20 VIIRS.

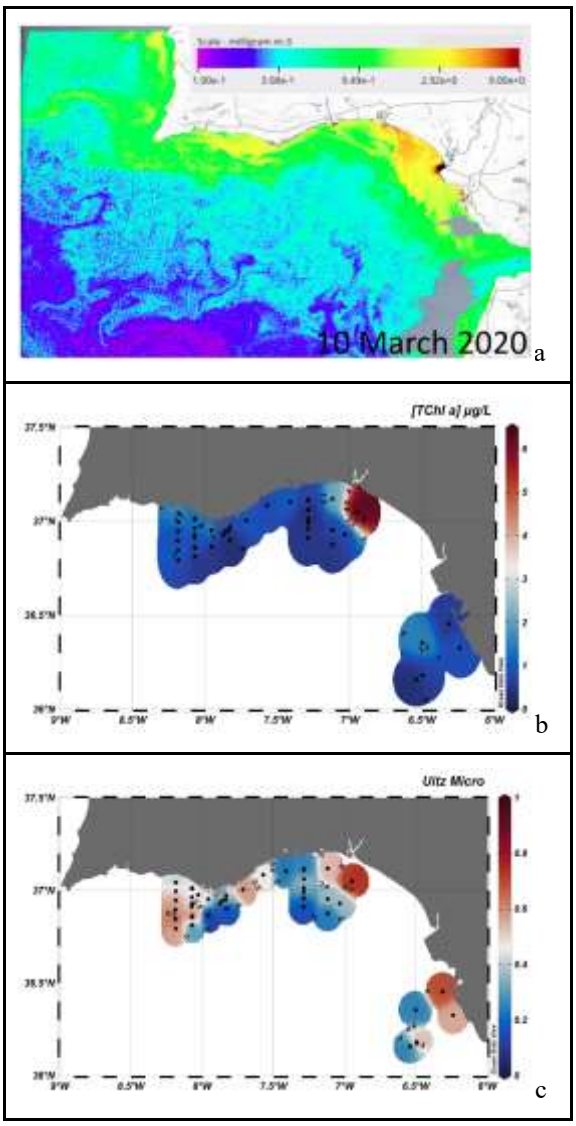


Fig. 5. a) Chla from Sentinel 3, b) Chla from in situ and c) relative abundance of microplankton size class for the south coast.

The OC3/OCI algorithms performed slightly better, with metrics showing a higher slope and correlation coefficient, lower intercept, RMSD and bias, and similar RPD (32.6% versus 31%). The OC5/OC5CI results showed an overall underestimation in Chla retrievals, suggesting that the OC5 look up table for NOAA-20 VIIRS could be improved. For all algorithms, the scatter is slightly higher than previous results obtained in similar waters (Tilstone et al., 2021): this could be attributed to differences in the in situ sampling techniques.

Fig. 5a shows Chla retrieved with Sentinel 3, at 300m spatial resolution , evidencing the spatial complexity of phytoplankton distribution, with the highest concentration near Guadiana mouth and off Cadiz, likely due to a strong input of nutrients; unfortunately the in situ sampling (Fig 5b) didn't cover this area, however the results from Fig. 5C evidence that microplankton relative abundance reaches 50% more in the regions where higher Chla is observed by satellite.

4. CONCLUSIONS

This short study demonstrates that research campaigns can contribute to in situ data gathering for MSFD monitoring. Furthermore, the data obtained have enabled a validation of satellite retrievals of Chla in Portuguese and Spanish waters supporting the use of remote sensing for synoptic scale.

Acknowledgements
Project Portugal Twinning for Innovation and Excellence in Marine Science and Earth Observation – PORTWIMS. Interreg Project IFADO Innovation in the Framework of the Atlantic Deep Ocean Portuguese Surveys: DCF-PNAB-IPMA: DEPM and PELAGO survey series

REFERENCES

Cartaxana, P., C.R. Mendes and V. Brotas, 2012. The COUL method. In Hooker, S.B., Clementson, L., Thomas, C., Schlüter, L., Allerup, M., Ras,. J., Claustre, H., Normandeau, C., Cullen, J., Kienast, M., Kozlowski, W., Vernet, M., Chakraborty, S., Lohrenz, S., Tuel, M., Redalje, D., Cartaxana, P., Mendes, C.R., Brotas, V., Matondkar, S.G.P., Parab, S.G., Neely, A., Egelend, E.S.. 2012. The Fifth SeaWifs HPLC

Gohin et al. 2005, Satellite-derived parameters for biological modelling in coastal waters: Illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. Remote Sensing Environment, 95, 29-46.

Hu et al. 2012, Chlorophyll-a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference, Journal of Geophysical Research: Oceans, 117, C01011.

O'Reilly et al. 2000, SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Tech. Memo. 2000-206892, Vol. 11, S.B. Hooker and E.R. Firestone, Eds., NASA Goddard Space Flight Center, 49.

Tilstone et al. 2021. Performance of Ocean Colour Chlorophyll-a algorithms for Sentinel-3 OLCI, MODIS-Aqua and Suomi-VIIRS in open-ocean waters of the Atlantic, Remote Sensing of Environment, 260.

Uitz, et al. (2006). Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: an assessment based on surface chlorophyll. Journal of Geophysical Research, 111, CO8005.

Boias oceânicas em tempo real - venturas, desventuras e aventuras

I. Martins (1), F. Diniz (1), N. Zacarias (1)

(1) Instituto Hidrográfico. Lisboa, Portugal. marina.martins@hidrografico.pt

Resumo: Desde 2009 o Instituto Hidrográfico mantém uma rede de boias oceânicas na vertente continental portuguesa, uma infraestrutura única no país, a contribuir para o sistema de monitorização em tempo real - MONIZEE.Esta rede foi evoluindo e muitas foram as lições aprendidas durante a epopeia de manutenção da rede de observação no ambiente hostil do Atlântico Norte. Águas calmas e ondas revoltas, boias penduradas e afundadas, homens ao mar e jantaradas, cabos nos hélices e pores-do-sol. Este trabalho pretende resumir as aventuras de uma epopeia de 13 anos a manter a operacionalidade de 6 boias, 5 pontos de observação, 64.710m de cabo, 600.000kg de poitas. Uma viagem no tempo marcada por mais de 5800 horas de navegação em navios científicos, corvetas, patrulhas e patrulhões, lanchas de fiscalização rápidas e lentas, botes e semirrígidas. Uma resenha de aventuras, desventuras e aventuras de manter viva a observação oceânica em tempo real.

Palavras-chave: boias multiparamétricas, engenharia oceanográfica, MONIZEE, tempo real

1. INTRODUÇÃO

Desde a segunda metade do século XX, o Instituto Hidrográfico (IH) tem vindo a desenvolver uma capacidade de monitorização em tempo real das condições oceanográficas da costa Portuguesa. No presente, esta infraestrutura de observação detém entre estações maregráficas, boias ondógrafo, radares costeiros de alta frequência e boias multiparamétricas, cerca de 40 estações de observação, distribuídas pelo território continental e insular nacional, integradas nas redes mundiais de monitorização.

Se as redes maregráfica e ondógrafo têm já o seu estabelecimento bem consolidado ao longo do tempo, as de radares costeiros e boias multiparamétricas são tecnologias mais recentes com cerca de uma década de desenvolvimento.



Fig. 1. Rede Portuguesa de monitorização em tempo real.

Esta rede de boias multiparamétricas, é atualmente constituída por cinco plataformas costeira e oceânicas, assentes em tecnologia maioritariamente norueguesa, com capacidade de sustentar múltiplos sensores. As boias multiparamétricas são plataformas concebidas para resistir às condições alterosas do Atlântico Norte e garantir longos períodos de permanência no mar. Estão providas de um sensor inercial capaz de medir a agitação marítima com elevada precisão e a sua autonomia energética é garantida por um sistema de baterias recarregáveis com painéis solares. Possuem um mastro que suporta a sinalização luminosa, diversos sensores meteorológicos, posicionamento e comunicações via satélite. O corpo das boias é instrumentado com diversos sensores oceanográficos de parâmetros físicos e de qualidade da água, destacando-se o de indicação de presença de hidrocarbonetos, especialmente relevante tendo em conta que estas boias estão localizadas próximas dos corredores de tráfego marítimo, garantindo a vigilância remota e envio de alertas de possíveis derrames. A componente submarina, constituída pelas amarrações que as mantêm fundeadas, tem instalados perfiladores acústicos que medem a corrente na primeira centena de metros da coluna de água e diversos sensores oceanográficos com as mais modernas capacidades de observação marinha disponíveis no mercado, de onde se destacam os sensores acústicos multidirecionais de escuta passiva. A calibração e qualidade das medições da maioria dos sensores é garantida pelo Laboratório de Calibração do Instituto, devidamente acreditado.

Estes autênticos laboratórios de observação remota apresentam uma grande flexibilidade visto poderem acomodar diversas configurações de sensores na sua estrutura e amarração. Os oceanógrafos reconfiguram-nas consoante os objetivos científicos, a estabilidade e comportamento da boia. São ainda utilizadas para comparação de dados colhidos por veículos autónomos a operar nas suas proximidades. Exemplo destas possibilidades são as parcerias e colaborações esporádicas, nacionais e internacionais,

que têm vindo a ocorrer no âmbito de projetos e campanhas científicas.

A maioria dos dados é enviada em tempo real para o IH, descodificados, sujeitos a processos de controlo de qualidade, armazenados e disponibilizados ao público através de portais digitais. Além dos dados em tempo real são igualmente recolhidos dados brutos, séries temporais mais longas e com parâmetros adicionais gravadas internamente nas boias. Os dados recolhidos durante as manutenções periódicas são sujeitos a análise e a um pós-processamento cuidado por oceanógrafos especialistas que garantem a elevada qualidade das séries temporais processadas para disponibilização à comunidade científica, nacional e internacional.

Para manter a qualidade das observações são necessárias duas grandes manutenções anuais durante nas quais se realiza a conservação de todos os diferentes componentes, sensores e amarração. Estas manutenções são levadas a cabo nos navios hidrográficos da classe NRP *D. Carlos I*, dotados de aprestos especiais para a manobra destas boias, quer em dimensão quer em capacidade de força e manobra.

A primeira destas boias a ser instalada foi a boia oceânica da Nazaré, em abril de 2009, a cerca de 35 milhas náuticas de costa, entre as ilhas dos Farilhões e os corredores de navegação, na zona profunda do canhão submarino da Nazaré (aproximadamente 2000 m de profundidade). A esta pioneira seguiu-se em 2010 a boia costeira da Nazaré, a cerca de 5 milhas de costa, na batimétrica dos 80 m na zona sul da cabeceira do canhão. Contemporaneamente foi instalada uma terceira boia, a 40 milhas náuticas ao largo de Leixões, numa batimétrica de cerca de 1600 m, integrando um projeto de cooperação transfronteiriça entre Portugal e Espanha. Visando alargar a rede de monitorização oceânica a sul de Portugal continental, em junho de 2014 foi fundeada uma quarta boia, nos cerca de 1200 m de profundidade, a cerca de 40 milhas náuticas a sul de Faro. Tem contribuído para o aprofundar do conhecimento dos processos físicos dominantes na área de escoamento da água Mediterrânica e servido de plataforma para instalação de outros sensores no âmbito de diversos projetos do Instituto.

Em abril de 2020 foi adicionado mais um ponto de observação destas plataformas multiparamétricas na zona sul da costa oeste continental portuguesa, complementando assim a monitorização ao largo da margem continental Ibérica Atlântica.

O sistema MONIZEE continental contribui atualmente para o projeto europeu JericoS3 – "Joint European Research Infrastructure of Coastal Observatories: Science, Service, Sustainability", um sistema de sistemas que reforça a rede europeia de observatórios costeiros, proporcionando uma infraestrutura de investigação europeia (RI) poderosa e estruturada, dedicada a observar e monitorizar os complexos mares costeiros.



Fig. 2. Fotos de algumas atividades de manutenção das boias multiparamétricas.

Ao longo dos anos muitas foram as peripécias e lições aprendidas com as manutenções destas boias de que a figura 2 é exemplo. Muitas mais lições e peripécias ainda temos pela frente, agora com as novas gerações a começar a tomar as rédeas desta aventura.

2. CONCLUSÃO

Com todos os desafios superados ao longo destes doze anos de experiência com estas plataformas multiparamétricas, no ambiente hostil que é o oceano Atlântico Norte, podemos afirmar que são plataformas extremamente robustas. Tal faz delas suportes particularmente adaptados à componente de monitorização e previsão operacional durante eventos extremos e crises em oceano, bem como estruturas de albergue para diversos desenvolvimentos científicos e tecnológicos.

Agradecimentos

Deixamos o agradecimento a todos aqueles que de uma forma mais direta ou indireta tornaram possível estes anos de venturas, aventuras e desventuras na manutenção da rede de boias multiparamétricas do sistema MONIZEE.

Caraterização da agitação marítima e das sobrelevações em torno das obras de expansão e requalificação do Porto Inglês (Ilha do Maio – Cabo Verde)

R. E. Soares (1), C.J.E.M. Fortes (1), M.G. Neves (1), R. Lemos (1), C. Costa (1), L.G. Silva (1), L. Pinheiro (1)

(1) NPE/DHA, LNEC, Av. Do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, rsoares@lnec.pt

Resumo: No âmbito do projeto das obras de expansão e requalificação do Porto Inglês, foram realizados no LNEC ensaios em modelo físico reduzido 3D que tiveram, entre outros objetivos, a caraterização da agitação marítima e das sobrelevações em torno das estruturas projetadas (quebra-mar destacado, ponte-cais e terrapleno). O modelo físico foi construído e explorado à escala geométrica de 1:44. Foram realizados ensaios com três níveis de maré, simulando-se ondas irregulares, associadas a 2 direções, W10S e S10W, 4 períodos de pico, Tp, de 11 s, 14 s, 17 s e 20 s e várias alturas de onda significativa, Hs, entre 1.5 m e 3.0 m. Para medir a agitação marítima e a sobrelevação, utilizaram-se 16 sondas resistivas. O tratamento das séries temporais medidas nas sondas foi realizado através de análise espetral e temporal. Neste artigo, efetua-se a descrição dos ensaios realizados e carateriza-se a tranquilidade portuária em função dos resultados obtidos.

Palavras-chave: agitação marítima, análise temporal e espetral, porto inglês, sobrelevação.

1. INTRODUÇÃO

No âmbito do projeto das "Obras de Expansão e Modernização do Porto Inglês", na ilha do Maio (República de Cabo-Verde), foram realizados ensaios em modelo físico tridimensional no LNEC, em 2020 [1].

Este artigo descreve os ensaios, em modelo reduzido tridimensional, de sobrelevação e agitação realizados para a ampliação e requalificação do porto de Porto Inglês, Ilha do Maio, República de Cabo Verde. Foram realizados ensaios com três níveis de maré, simulando-se ondas irregulares com o espectro de Pierson-Moskowitz-Kitaigorodskii (PMK), associadas a duas direções (W-10-S e S-10-W) e quatro períodos de pico (entre 11 s e 20 s). Associados a cada direção, cada nível de maré e cada valor do período, foram reproduzidos vários valores de altura de onda significativa, Hs, compreendidos entre 1.5 m e 3.0 m. Neste trabalho, a discussão de resultados é feita para a direção de W-10-S e o período de pico de 17 s.

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO MODELO

O modelo físico tridimensional foi construído nas instalações experimentais do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do LNEC, num tanque de ondas do Pavilhão de Hidráulica Marítima com 30 m de comprimento, 19.6 m de largura, equipado com 2 geradores móveis de ondas irregulares com 6.0 m de comprimento cada, para profundidades de água até 0.75 m, Figura.1.

O modelo físico foi construído e explorado à escala geométrica de 1:44, de acordo com a Lei de Semelhança de Froude. Os fundos do modelo foram reproduzidos até à batimétrica - 20 m(ZH), Figura. **2**.



Figura.1. Aspeto das instalações experimentais do Pavilhão de Hidráulica Marítima do LNEC.

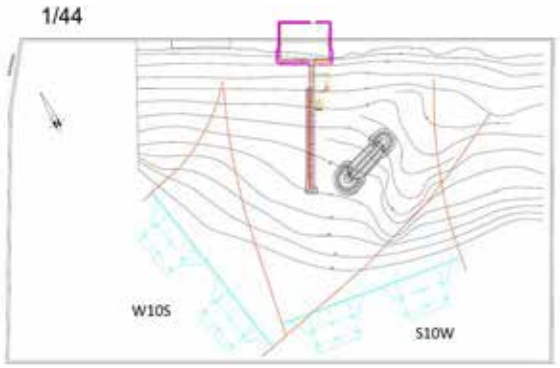


Figura. 2. Batimetria e esquema da implantação. Posição dos geradores de ondas.

Foram reproduzidos no modelo:

- a ponte-cais existente sobre estacaria com 343 m de comprimento por 14.5 m de largura e coroamento a +4.0 m (ZH);
- a cortina de estacas-prancha vertical adjacente ao lado Poente e Sul, dotada de viga de betão no coroamento e tapete de proteção do pé em enrocamentos;

- o quebra-mar de taludes destacado (QMD), com fundação sensivelmente entre as cotas -12.0 m (ZH) e -6.0 m (ZH);
- duas rampas Ro-Ro sobre estacaria, com 40 m de largura e coroamento à +4,4 m(ZH), e as suas plataformas de acesso;
- a proteção marítima do terrapleno, em enrocamentos, com murete no coroamento.

Foram realizados ensaios para a solução inicialmente projetada (Fase 1) e para soluções semelhantes mas correspondentes a alterações sugeridas pela projetista no decurso dos ensaios (Fases 2 e 3).

Na Fase 2 foram alterados o peso do enrocamento do quebra-mar destacado e elevada a sua cota de coroamento, além de reduzida a distância entre blocos do pé do talude. Foi ainda aumentado o peso dos blocos de enrocamento de proteção da base da cortina de estacas-prancha e da proteção SW do terrapleno e aumentada a cota de coroamento da proteção SW do terrapleno e do murete exterior da ponte-cais.

Na Fase 3 foram realizados ensaios complementares sem cortina de estaca-prancha - Fase 3b (para comparação com a situação atual) e com cortina de estaca-prancha com aberturas - Fase 3a.

Os ensaios de agitação e de sobrelevação incluíram 2 direções de onda (W-10-S e S-10-W) e diferentes alturas de onda significativas e períodos de pico, Tp (11 s, 14 s, 17 s e 20 s), assim como três níveis de maré (ZH, +1.6 m ZH, +1.9 m ZH), Figura. *3*.

3. ENSAIOS DE AGITAÇÃO

3.1. Condições gerais

Os ensaios de agitação tiveram como objetivo medir a agitação marítima em redor das duas estruturas do modelo, nomeadamente da cortina de estacas-prancha e do quebra-mar destacado. Pretendeu-se caraterizar nas 3 fases do trabalho, o abrigo fornecido pelas estruturas às condições de agitação incidente.

Nos ensaios de agitação, Figura. *3*, foi medida a série temporal da elevação da superfície livre utilizando sondas resistivas Wallingford colocadas em 14 pontos na proximidade das estruturas, bem como 2 sondas à saída dos geradores de ondas irregulares, Figura. *4*. O tratamento das séries temporais medidas nas sondas foi realizado através de análise espetral e temporal, calculando-se o período de pico, Tp, e a altura de onda significativa, Hs.

3.2. Resultados e discussão

Para analisar a agitação na proximidade das estruturas, calcularam-se índices de agitação dados pela relação entre os valores de altura de onda significativa, Hs registados em cada um dos pontos situados junto às obras e os valores de altura de onda significativa registados em frente aos geradores de ondas irregulares, H_0.

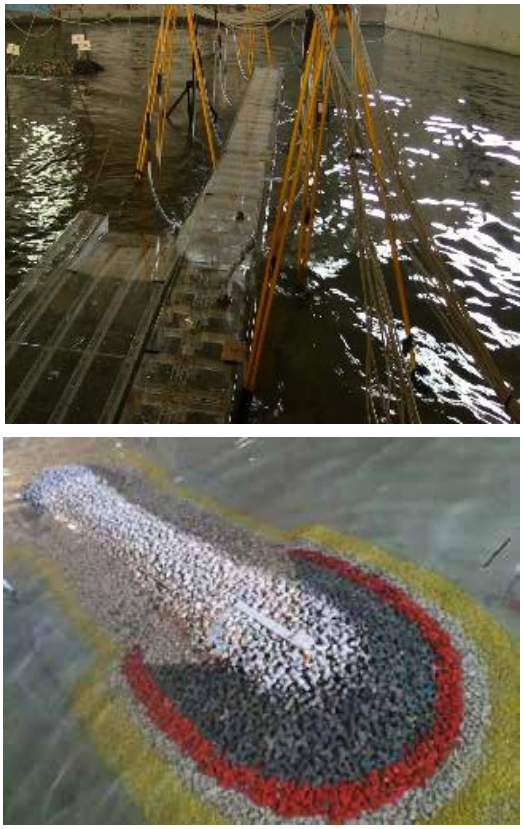


Figura. 3. Vista do modelo da ponte-cais e do quebra-mar destacado.

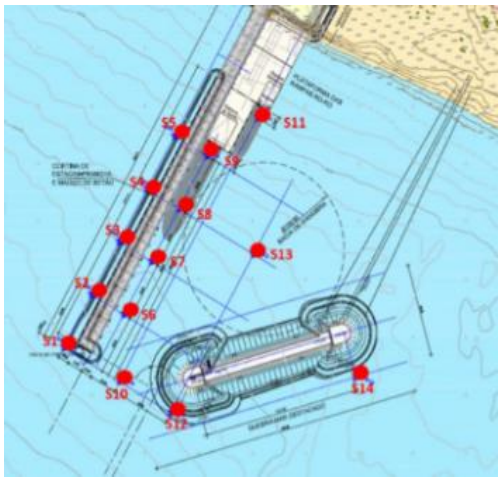
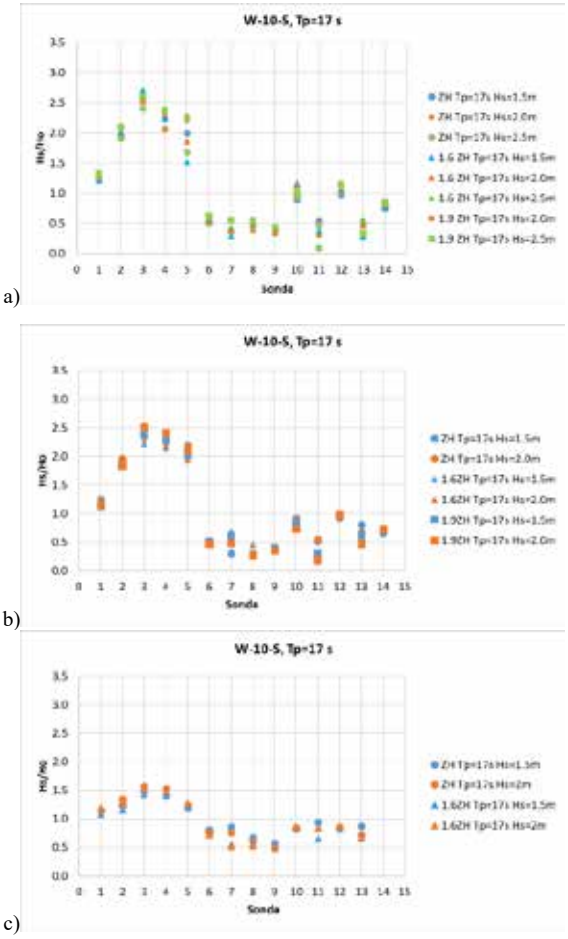


Figura. 4. Localização das sondas (adaptado das especificações fornecidas pela CONSULMAR [2] e imagem das sondas no modelo.

Na Figura. *6* apresenta-se, a título exemplificativo, os índices de agitação, Hs/H_0, obtidos em cada uma das 14 sondas nos ensaios com W-10-S e Tp=17 s para diferentes níveis de maré e alturas de onda significativa incidente, da Fase 1 à Fase 3a. Na Figura. *6* apresenta-se os valores correspondentes à Fase 3b, sem cortina.

Os resultados obtidos na Fase 3 (a e b) foram comparados entre si, isto é, foram comparados os índices de agitação obtidos sem cortina de estaca-prancha (Fase 3b), com cortina de estaca-prancha (Fase 2) e cortina de estaca-prancha com aberturas (Fase 3a). Na Figura. *8* apresenta-se esta comparação

para o nível de maré de +1.6 m (ZH), Tp=17 s e Hs=2 m.



a)

b)

c)

Figura. 5. Resultados dos ensaios de agitação para W-10-S e Tp=17 s, a) Fase 1; b) Fase 2; c) Fase 3a, com cortina com aberturas.

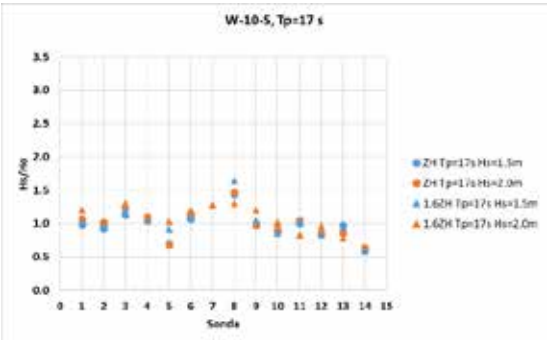


Figura. 6. Resultados dos ensaios de agitação para W-10-S e Tp=17 s, Fase 3b: sem cortina.



Figura. 7. Comparação de resultados dos ensaios de agitação para +1.6 m (ZH), Tp=17 s e Hs=2 m, Fase 2, Fase 3 (a e b).

Da análise da Figura. *5*, conclui-se que com a direção de W-10-S e no caso das soluções das Fases 1 a 3a (com cortina de estacas pranchas e aberturas):

- A zona exterior da cortina de estacas-prancha encontra-se exposta a esta direção de agitação incidente, apresentando os maiores valores de H/Ho encontram-se nas sondas S1 a S5, superiores a 1.0. Em contrapartida, a zona no interior do porto (S6 a S9, S11 e S13) encontra-se mais abrigada, sendo que na maioria dos casos os H/Ho são da ordem de 1.0 ou inferiores;
- Para as sondas S1 a S5, há uma clara tendência de aumento dos índices de agitação da sonda S1 para a sonda S3, onde há empolamento da onda próximo à cortina de prancha, diminuindo em S4 e S5 devido à quebra devido à diminuição da profundidade. Em geral, os H/Ho na solução da Fase 3a (aberturas na cortina), são inferiores aos das outras soluções;
- Para as sondas S6 a S9, S11 e S13, os H/Ho estão em torno de 0.5, nas soluções com cortina sem aberturas (Fase 1 e 2) e um pouco superiores na Fase 3a devido à presença de aberturas na cortina, que permite que a agitação entre no interior do porto.
- Os valores em frente ao QMD em S10 e S12 são da mesma ordem de grandeza, ou seja, da ordem de 1.0. O S14 tem valores ligeiramente inferiores;
- O aumento da altura da onda incidente ou do nível da maré não se reproduz em tendência para os valores dos índices de agitação.

No caso da solução da Fase 3b (sem cortina), Figura. *6* os valores dos índices são da ordem de 1.0 em praticamente todas as sondas, ocorrendo os valores mais elevados no interior do porto.

A comparação entre a solução sem cortina de estacas-prancha (Fase 3b), com cortina (Fase 2) e com cortina com aberturas (Fase 3a), mostra que a solução com cortina com aberturas leva a resultados inferiores à situação com cortina completa e superiores à situação sem cortina, na zona exterior da ponte-cais. O inverso é verdadeiro em pontos dentro do porto, especialmente nos pontos S11 e S13, ou seja, a solução com cortina de estacas-prancha com aberturas (Fase 3a) leva a índices acima da situação com cortina de estacas-pranchas (sem aberturas, fase 2) e abaixo da situação sem cortina de estacas-pranchas (Fase 3b).

4. ENSAIOS DE SOBRELEVAÇÃO

4.1. Condições gerais

Os ensaios de sobrelevação tiveram como objetivo avaliar as condições de sobrelevação em pontos notáveis na proximidade das estruturas. As condições de agitação ensaiadas foram as mesmas dos ensaios de agitação (ver 3.1). Nos ensaios de sobrelevação foi utilizado o registo da série temporal da elevação da superfície livre utilizado nos ensaios de agitação, ou seja, em 14 pontos junto às estruturas, Figura 3.

4.2. Resultados e discussão

O tratamento das séries temporais medidas nas sondas foi realizado através de análise espetral, calculando-se o valor de Hs para períodos no protótipo superiores a 50 s e obtendo-se os valores da sobrelevação como valor de amplitude de crista (aproximadamente igual a Hs/2).

A Figura. *8*, apresenta-se, a título exemplificativo, os resultados de sobrelevação obtidos em cada uma das 14 sondas nos ensaios com W-10-S e para diferentes níveis de maré e alturas de onda significativa incidente, para diferentes níveis de maré e alturas de onda significativa incidente, da Fase 1 à Fase 3.

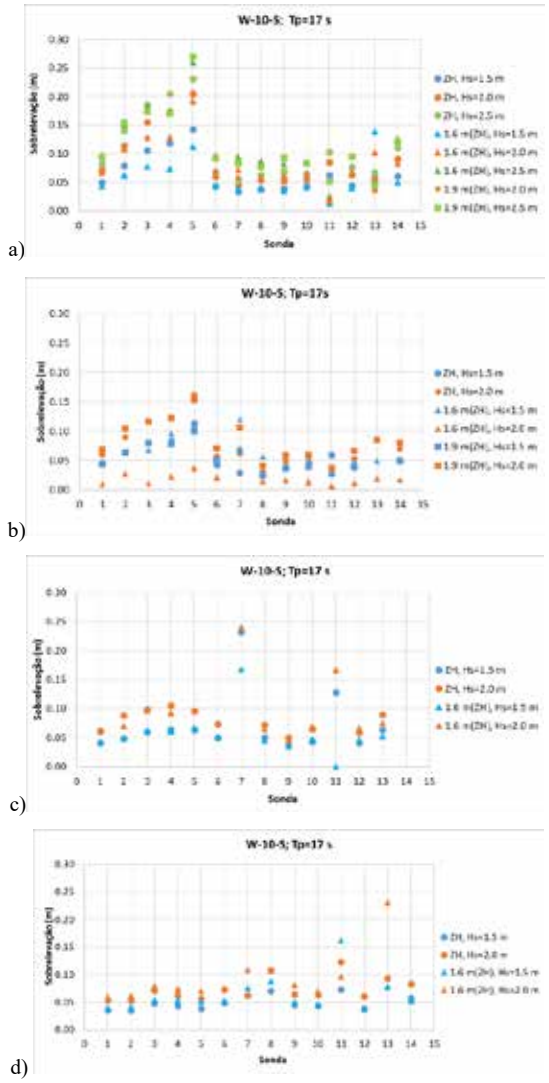


Figura. 8. Resultados dos ensaios de sobrelevação para W-10-S e Tp=17 s, a) Fase 1; b) Fase 2; c) Fase 3a, com cortina com aberturas; d) Fase 3b, sem cortina.

4.3. Discussão

Da análise dos dados de sobrelevação provenientes do modelo físico de acordo com os resultados obtidos, as obras previstas introduzem a possibilidade de estabelecer sobrelevações, embora estejam a ocorrer atualmente, como mostram os resultados obtidos nos ensaios realizados sem estaca-prancha.

A ação da direção das ondas W-10-S induz sobrelevações mais evidentes na zona exterior da ponte cais, particularmente nos pontos S3, S4 e S5. A concentração de energia é visível ao longo da parte exterior do cais, que deverá ser o principal responsável pelas sobrelevações nesta zona, cujo valor máximo é de 0.27 m. Os valores de sobrelevações máximas obtidas foram sempre abaixo de 0.30 m.

Os testes para a solução com estacas-pranchas com aberturas (Fase 3a) apresentaram valores de sobrelevação mais baixos do que as outras soluções, com valores inferiores a 0.12 m, com exceção dos pontos S7 e S11, que apresentaram valores atingindo 0.24 m e 0.18 m, respetivamente. Os testes com a solução sem cortina de estacas-prancha (Fase 3b) apresentaram valores de sobrelevação inferiores a 0.15 m, com exceção dos pontos S11 e S13, que atingiram valores de 0.16 cm e 0.23 cm, respetivamente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo descreve os ensaios, em modelo físico tridimensional, de agitação e sobrelevação realizadas para a ampliação e requalificação do Porto Inglês, Ilha do Maio, República de Cabo Verde.

Da análise dos resultados de agitação, verifica-se que para as soluções da Fase 1 a 3a, e para a direção W-10-S, a zona externa da ponte cais é claramente desprotegida à agitação incidente. Em contrapartida, o interior do cais (S6 a S9 e S13) já apresenta alguma proteção. Em S10 e S12, nenhuma tendência é evidente e os valores são semelhantes para ambas as direções.

A comparação entre a solução sem cortina de estacas-prancha (Fase 3b), com cortina de estacas-prancha (Fase 2) e com cortina de estacas-pranchas com aberturas (Fase 3a), mostra que, para pontos fora do cais, a solução de estacas-pranchas com aberturas leva a valores de índices de agitação intermédios entre os obtidos com cortina completa e sem cortina, verificando-se o inverso para pontos dentro da bacia portuária.

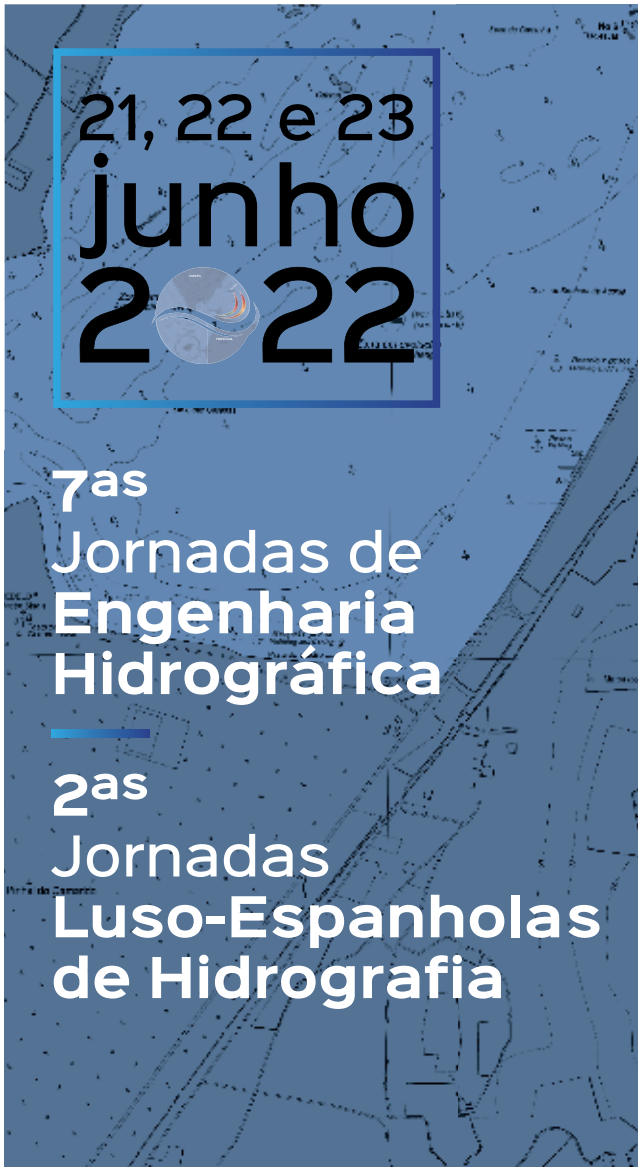
Da análise dos dados de sobrelevação provenientes do modelo físico verificou-se que as obras previstas poderão introduzir sobrelevações ligeiramente superiores às que ocorrem atualmente no local.

REFERÊNCIAS

[1] CONSULMAR (2020) - Travaux d'extension et Modernisation du Port Inglês, Île de Maio, Spécification des Essais sur Modèle Physiques Réduit 3D et Simulations sur Modèle Numérique.

[2] LNEC (2020) – Travaux d´expansion et requalification du port inglês, île de Maio, République du Cap Vert. Etudes sur modele reduit 3D et sur modelé numérique. Rapport final: études sur modèle réduit 3D. Relation /2020. Janeiro.

GEOLOGIA MARINHA



Origins and controlling factors of bedforms formed by supercritical sediment density flows on the southern shelf of Madeira island

V. Belvisi (1,2,3), R. Quartau (1,2), C. Romagnoli (3), D. Casalbore (4,5), J. Madeira(1), A. Rodrigues (2)

(1) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. vbelvisi@fc.ul.pt

(2) Instituto Hidrográfico, Divisão de Geologia Marinha, Lisboa, Portugal

(3) University of Bologna, Dip. Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali, Bologna, Italy

(4) Sapienza Università di Roma, Dipartimento Scienze della Terra, Roma, Italy

(5) Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Area della Ricerca, Roma, Italy

Abstract: Madeira is a tall volcanic island, characterized by a well-developed drainage network forming interfluves within the tall cliff coastline. During the colder season, it is often subjected to concentrated rainy events making the island prone to flash floods that deliver sediments to the shelf. The analysis of multibeam bathymetry of the southern shelf of Madeira Island (Atlantic Ocean) allowed observing the presence of 10 bedform fields. The morphometric characterization of sediment waves within these bedforms allowed understanding their origin and development. The bedforms can occur within channels or on top of fan shaped elevation features. Among these, some of the bedforms are linked to the discharge of streams and others related to stormy waves. Independently of their triggering mechanism, they are most likely formed by sediment density flows crossing the shelf and their morphology allowed them to be classified as cyclic steps.

Keywords: bedforms, cyclic steps, insular shelf, Madeira island, sediment density flows.

1. INTRODUCTION

Subaqueous bedform fields were observed along the southern shelf of Madeira Island. The presence of high-resolution multibeam bathymetry from different years and sediment samples allowed investigating these bedforms in detail. The aim was to characterize them to better understand their origin and the key factors that promote their formation. Here, we propose a systematic grouping according to onshore and offshore characteristics and a conceptual model of bedform formation.

2. GEOLOGICAL SETTING

Madeira is a volcanic island belonging to the Madeira Archipelago in the Eastern North Atlantic Ocean (Figure 1). It was formed by volcanic activity from 0-7 Ma, consequence of a slow-moving hot-spot within the Nubian Plate towards NE. Its subaerial part is characterized by an intense network of torrential streams which promote the occurrence of landslide and flash floods especially during extreme rainy events. The coastline is dominated by tall cliffs, only interrupted on the southern coast by stream mouths.

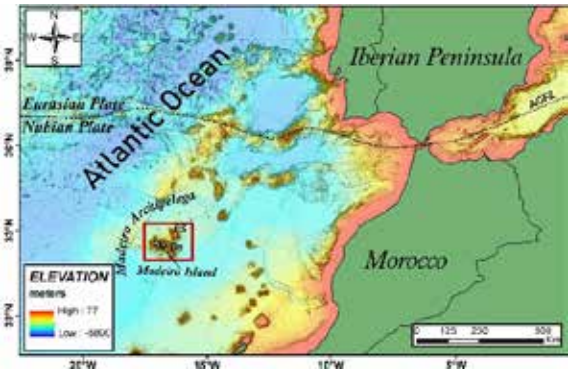


Fig. 1. Geographic setting of Madeira Archipelago in the Eastern North Atlantic. Azores-Gibraltar Fracture Zone (AGFZ) according to Geldmacher et al., (2000); PS: Porto Santo; De: Desertas Islands.

3. DATA & METHODS

The morphological analysis was mainly carried out using a 2002 multibeam bathymetry of the southern shelf, from 0 to -175 m (red to blue in Figure 2). Recent bathymetries (2013 and 2019) were analysed to check for seafloor changes (red and dark blue polygons in Figure 2). 397 sediment samples were collected from the coastline to -100 m in two different years (2002 and 2007, black and purple dots in Figure 2). Both data belong to Instituto Hidrográfico.

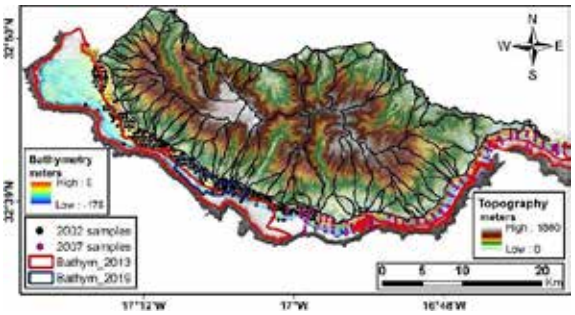


Fig. 2. Digital Terrain Models of Madeira Island and southern shelf from the 2002 survey. The depth scale refers to the shelf areas from 0 to -175 m, superimposed on the shaded relief from the coastline to -712 m (in grey). Red lines delimit the areas of the 2013 bathymetry and purple lines delimit the 2019 bathymetry. The dots in black and in purple represent the samples collected in 2002 and 2007, respectively. Black polygons enclose areas of hydrographic basins. The areas in white have no data.

The morphometric analysis was made on representative along-slope profiles to characterize the bedforms. For each profile, several parameters were recognized (Figure 3). The measurements were used for creating box and scatter plots to characterize the bedform dimensions and assess relationships between them.

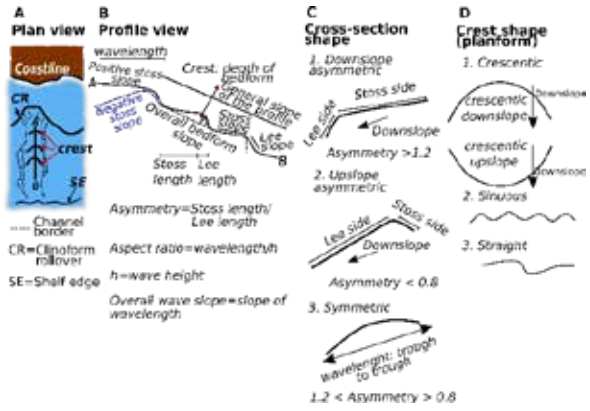


Fig. 3. Terminology of the observed features and related parameters adopted in the morphometric analysis. (A) Plan view of a channel with bedforms incising the shelf (B) Profile view of section A-B drawn in (A), showing the measurements taken. (C) Cross section shape. (D) Crestline shape. Modified from Normandeau et al. (2016).

4. RESULTS

The southern shelf of Madeira Island has ten bedform fields (Figure 4) inside channels or on top of fan-shaped features. Onshore, stream outlets or tall cliffs and lava flows are present (Figures 5, 8, 10). According to these two elements, the bedform fields have been divided into two main groups, linked and not linked to hydrographic basins, both found inside channelized features and on top of fan-shaped features.

On both groups, the channels develop perpendicular to the coastline, present different size and patterns, more developed at the shelf edge (deeper incision) and less developed upslope. All the bedforms shows similar wavelength and wave-height (see Table I) and have crescent shape in plan-view.

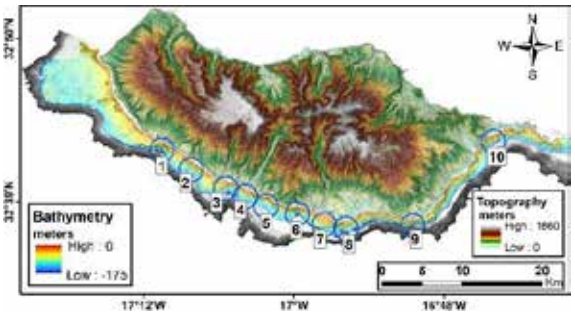


Fig. 4. Map of the bedform fields recognized in the southern shelf of Madeira Island. The numbered blue circles identify each bedform field.

In both groups, the fan-shaped features are predominantly linked to hydrographic basins, and those that show no link are much narrow. The bedforms are mostly sinuous or straight in plan-view and those on areas linked to hydrographic basins show greater wavelengths and wave-heights (see Table I).

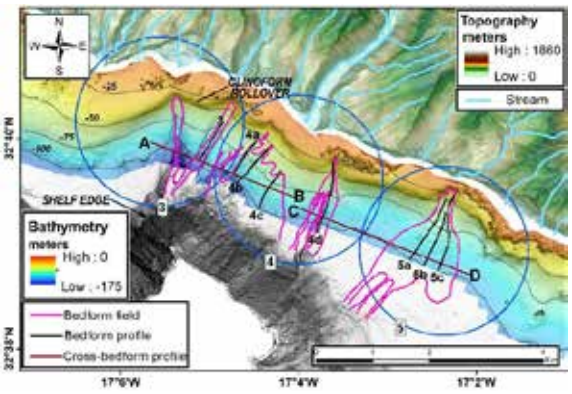


Fig. 5. Shaded relief bathymetry of bedform fields 3, 4 and 5 (see location in Fig. 4). Contours are in meters. The cross-section profiles (A-B and C-D) are in Figures 7 and 8 respectively. The profiles used to investigate the bedform fields 3, 4 and 5 are in black.

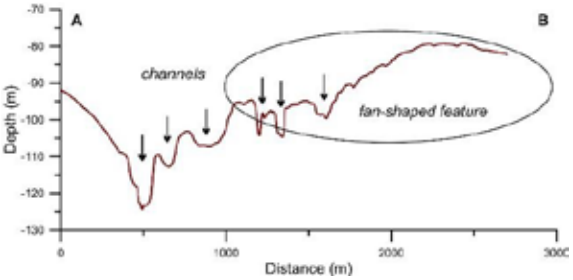


Fig. 6. Cross-section of bedform fields 3 and 4. Location of profile is in Figure 5.

The comparison between multitemporal bathymetries showed that the bedforms were affected by erosion and deposition processes on their stoss and lee side (Figure 12).

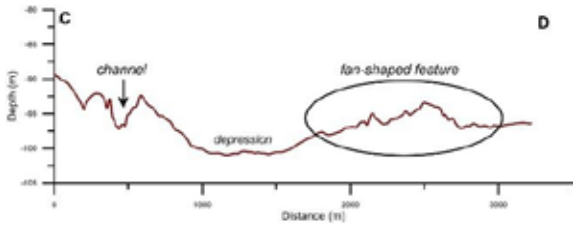


Fig. 7. Cross section at the bedforms 4d and 5. Location of profile in Figure 5.

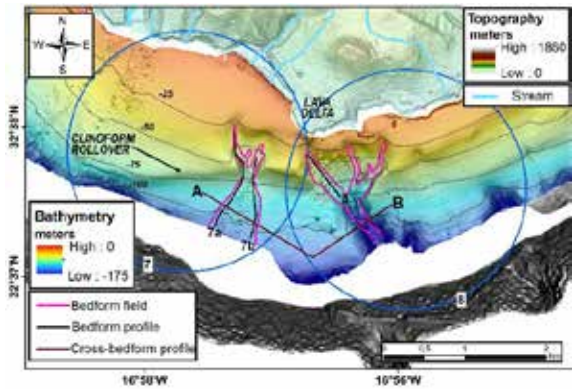


Fig. 8. Shaded relief bathymetry of bedform fields 7 and 8 (location in Fig. 4). Contours are in meters. The cross-section profile (A-B) is in Figure 9. The profiles used to investigate the bedform fields 7 and 8 are in black.



Fig. 9 Cross-section of the bedform fields 7 and 8. Location in Figure 8.

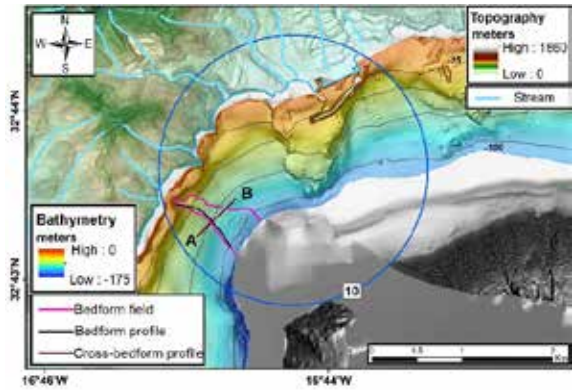


Fig. 10. Bedform field 10. Rose line delimits the area with bedforms. Brown line A-B represents the cross-section profile along the bedforms in Figure 11 and black line is the topographic profile used to morphometric analysis. Grey lines represent isobaths every 25 m. Subaerial and submarine areas have the same legend as that of Figure 4.

The distribution of the finer sediments revealed that most of bedform fields (7) are located where there is a higher percentage of silt and clay. This percentage is higher (60-80% in Fig. 9) in the central part of the shelf and decreases towards east.

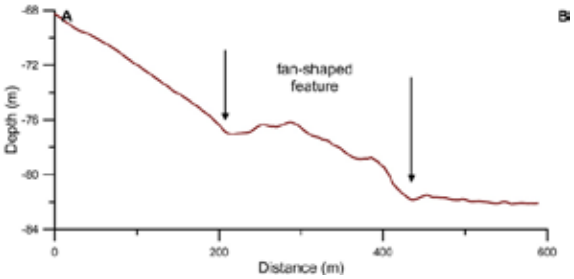


Fig. 11. Cross-section of the bedform 10. Location in Figure 10.

Tab. i. Resume of the bedform main characteristics

	Bedforms fields linked to hydrographic basin (GROUP 1)		Bedforms fields not linked to hydrographic basin (GROUP 2)	
	Channelized features	Fan-shaped features	Channelized features	Fan-shaped features
ID number	1, 2, 3, 4	4,5,7	6,8,9	10
Hydrographic basin area (km²)	1 - 10	4.5 - 41	-	-
Onshore morphology	stream outlets		tall cliff/ lava delta	
Clinoform rollover steepness (°)	6 - 23	8 - 11	7 - 15	16
Incision of shelf edge (m)	few meters to more 50	-	few meters to ~40	-
Elevation of fan features (m)	-	5 to ~ 10	-	6
Feature steepness (°)	4.7 - 13	4.5 - 7	4 - 11	6.8 – 4.2
Plan-view bedform crest shape	crescentic	mostly sinuous	crescentic	sinuous/crescentic
Bedform parameters				
wavelength (m)	39.6 ± 9.6	71.9 ± 16.7	35.6 ± 11.6	33.7 ± 5.7
Wave-height (m)	2.2 ± 0.8	3.7 ± 0.9	2.4 ± 0.5	1.5 ± 0.3
Stoss-side slope (°)	3.3 ± 1.6	1.7 ± 1.2	-0.7 ± 1.4	-1.04 ± 1.1
Lee-side slope (°)	9.2 ± 2.8	12.7 ± 2.8	10 ± 1.5	10.4 ± 1.4
Bedform slope (°)	4.2 ± 0.9	4.2 ± 0.8	4.2 ± 0.6	5.1 ± 0.7
Asymmetry	1.2 ± 0.5	2.3 ± 0.8	1.3 ± 0.7	1.2 ± 0.5
Cross-section shape	DSA	DSA	DSA	DSA

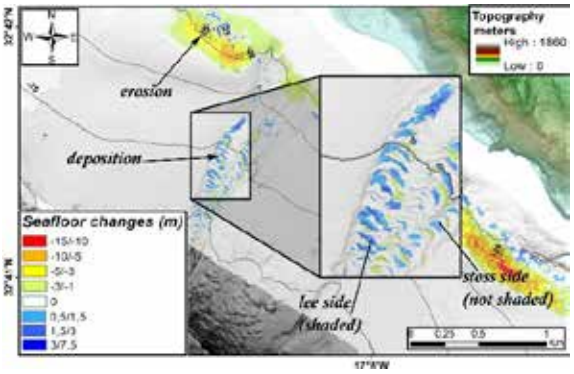


Fig. 12. Seafloor changes between the 2002-2019 surveys in bedform field 2 (location in Fig. 4). In blue tones, the areas were subjected to deposition, from light green to red, the areas subjected to erosion. Contours are in meters.

The different onshore and offshore characteristics allowed dividing the shelf on four morpho-dynamics sectors (Figure 14) described on table II.

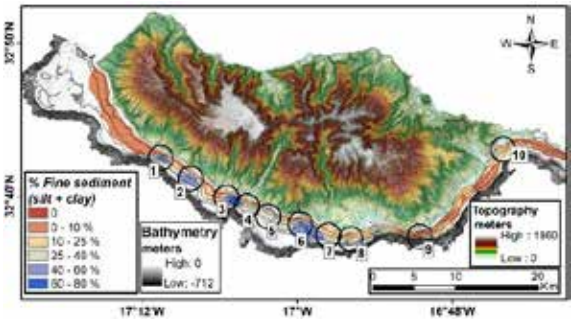


Fig. 13. Fine-grained sediment distribution along the shelf. Subaerial and submarine areas have the same legend as that of Figure 3. Contours are every 25 m. Circles represent the bedform fields as in Figure 4.

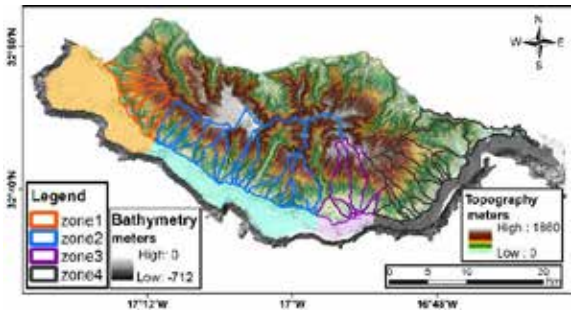


Fig. 14. Sector subdivision of the shelf according to the different fine-grained sediment distribution and onshore-offshore characteristics.

Tab. ii. Morpho-sedimentary characteristics of the main 4 areas of the insular shelf.

	ZONE 1 (average ± standard dev.)	ZONE 2 (average ± standard dev.)	ZONE 3 (average ± standard dev.)	ZONE 4 (average ± standard dev.)
Subaerial slope (°)	25 ± 14	32 ± 15	23 ± 14	24 ± 13
Insular shelf slope (°)	1,9 ± 2,2	4,6 ± 4	5,4 ± 4	5,5 ± 4
Shelf area (km²)	83,9	66,8	14,7	46,9
Hydrographic basin size (km²)	3,6 ± 2	7,8 ± 10	6,6 ± 6	6,8 ± 7
Φ granulometric distribution (mode)	1 ± 0,5	2,6 ± 1	3 ± 0,3	1,4 ± 0,8
% fine-grained sediment	1 ± 1	30 ± 17	26 ± 10	11 ± 8
N° of bedform fields	-	7	1	2
Area of bedform fields (km²)	-	6,28	1,12	0,26

5. DISCUSSION AND CONCLUSION

The high-resolution multibeam bathymetry of the southern shelf of Madeira Island allowed a detail study of the bedform fields. These fields were grouped, first, according to the connection or not to hydrographic basins and then if they developed inside channels or on top of fan-shaped features. Four different classes were defined and for each of them we suggest distinct origins. The bedform fields in channels and linked to hydrographic basins are the result of sediment density flows triggered by flashfloods that reach the ocean. The contrast between the flood flow and the ocean water generates a hyperpicnal flow which evolves into a turbidity current. Instead, the fan-shaped featured could be formed by multitemporal landslides due to an overload of sediment that promote the failure and the consequence development of sediment-density flows. Bedform fields not linked to hydrographic basins are created by the same processes but triggered by the seaward currents generated when waves hit the cliffs during storms (Figure 15). A key factor is the percentage of fine sediments; when it is higher, it favours the formation of wider fields and well-developed bedforms. Conversely, coarser sediments with low percentage of fine fraction favours smaller bedform fields. In fact, the easternmost area shows the smallest bedform fields. The high variability in size and height of the bedforms, their asymmetry, the alternation of erosion and deposition on the stoss and lee side, the steepness of the shelf suggests that these features are cyclic steps or transitional features consequence of the occurrence of turbidity currents triggered either by waves of by hyperpicnal flows as found in similar geological settings (Babonneau *et al*., 2013).

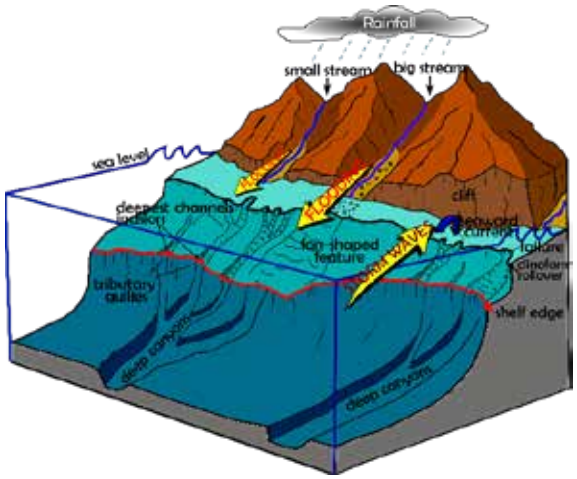


Fig. 15. Sketch showing the main trigger mechanisms of bedform formation. Blue arrow represents seaward downwelling currents.

REFERENCES

Babonneau, N. *et al*., (2013). Direct sediment transfer from land to deep-sea: Insights into shallow multibeam bathymetry at La Réunion Island. *Marine Geology*, *346*, 47–57.

Geldmacher, J. È. *et al., (*2000). The 40 Ar/ 39 Ar age dating of the Madeira Archipelago and hotspot track (eastern North Atlantic). *Geochem. Geophys. Geosys*t, 1 (23).

Normandeau, A. *et al.*, (2016). Morphological expression of bedforms formed by supercritical sediment density flows on four fjord-lake deltas of the south-eastern Canadian Shield (Eastern Canada). *Sedimentology*, *63*(7), 2106–2129.

Present-day sedimentary processes on the shelves of volcanic ocean islands: the study case of the southern shelf of Porto Santo island (Madeira archipelago)

S. Innocentini (1,2,3), R. Quartau (1,2), D. Casalbore (3), M. Cachão (1), J. Madeira (1), R. Santos (1,2), A. Rodrigues (2)

(1) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. innocentini.1823681@studenti.uniroma.it

(2) Divisão de Geologia Marinha, Instituto Hidrográfico, Lisboa, Portugal.

(3) Sapienza Università di Roma, Dipartimento Scienze della Terra, Roma, Italy.

Abstract: Shelves surrounding volcanic islands host sediments that result from subaerial erosion, explosive volcanism and accumulation of carbonate skeletal particles. In this study, we try to understand how the current sediments of the southern shelf of Porto Santo (Madeira archipelago) were formed. We used 100 sediment samples, multibeam bathymetry and seismic reflection profiles to characterize them. The seafloor sediments are mostly well sorted sands with carbonate skeletal particles representing on average 78% of the grains. The comparison of subaerial erosion rates (that feed the beach and ultimately end on the shelf) with the present-day volume of sediments on the shelf (30% higher than expected) implies that either erosion rates are underestimated or there is a present-day primary carbonate production. Our characterization of the sediments with binocular microscope supports the last hypothesis, suggesting a higher contribution of the carbonate factory to the shelf sediments on old and inactive volcanic islands.

Keywords: carbon factory, insular shelf, Porto Santo island, sediment samples, sedimentary processes.

1. INTRODUCTION

This work aims to improve our understanding of the sedimentation processes acting on insular shelves based on the case-study of Porto Santo Island. In 2008, under the scope of a marine aggregate assessment study for the Madeira Regional Government (Instituto Hidrográfico, 2008), geophysical and a sediment sampling survey was performed by the Portuguese Hydrographic Institute (IH) on the southern insular shelf. The sedimentological characterization of the previously collected data allows a preliminary interpretation of the factors controlling the depositional processes on the insular shelf, such as subaerial erosion, accumulation of carbonate skeletal particles and transport of sediments by waves and currents.

2. GEOLOGICAL SETTING

Porto Santo Island (Madeira Archipelago) comprises submarine and subaerial volcanic rocks of a complex volcanic edifice, extinct 10 Ma ago. It is partially covered by more recent sedimentary rocks (Ferreira & Neiva, 1996), Pleistocene aeolian calcarenites, formed by wind-blown sediments of the exposed shelf during lower sea levels, and local calcareous crust (Middle-Miocene) occupy ~1/3 of the island surface (Silva et al., 2019; Fig. 1). The southern coast is formed by a 9 km-long beach. According to Silva et al. (2019) the effective sediment yield (evaluated around 5000 $m^3 \cdot yr^{-1}$) is due to ephemeral streams that feed the beach and ultimately end on the shelf. The coastline layout and the wave dominant directions (Fortes et al., 2006), suggests a general south-westward longshore sediments drift. Shelf sediments are unconsolidated biogenic carbonate sand, stored since the Last Glacial Maximum (LGM) covering an erosional surface carved into the volcanic substrate (Innocentini et al., 2022).

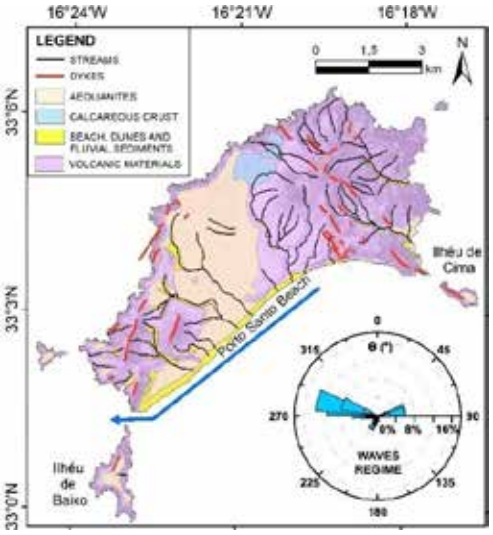


Fig. 1. Simplified geological map of Porto Santo Island (modified from Innocentini et al., 2022). Blue arrow represents the longshore sediment drift direction (Silva et al., 2019). Rose diagram of wave frequency shown in the lower-right was adapted from Fortes et al. (2006).

3. DATA AND METHODS

100 samples from the shelf seabed were collected by a Smith-McIntyre grab sampler (Fig. 2A). The grain-size and carbon content analysis have been carried out at IH (IH, 2008). Sediments have been classified according to Folk & Ward (1957). Around 300 grains for 25 representative samples have been studied with binocular microscope in order to define their nature (volcanoclasts or bioclasts). The results have also been integrated with the multibeam bathymetry data and backscatter mosaic (Fig. 2B). The seafloor shelf nature has been classified calibrating the variation of the surface backscatter signal (in dB) to the grain-size of the corresponding sediment samples (in ϕ); for this purpose, for each sample has been considered the 50° percentile (P50) of the grain-size distribution curve (Fig. 3). Seismic profiles allowed to calculate the volume of sediments present on the shelf.

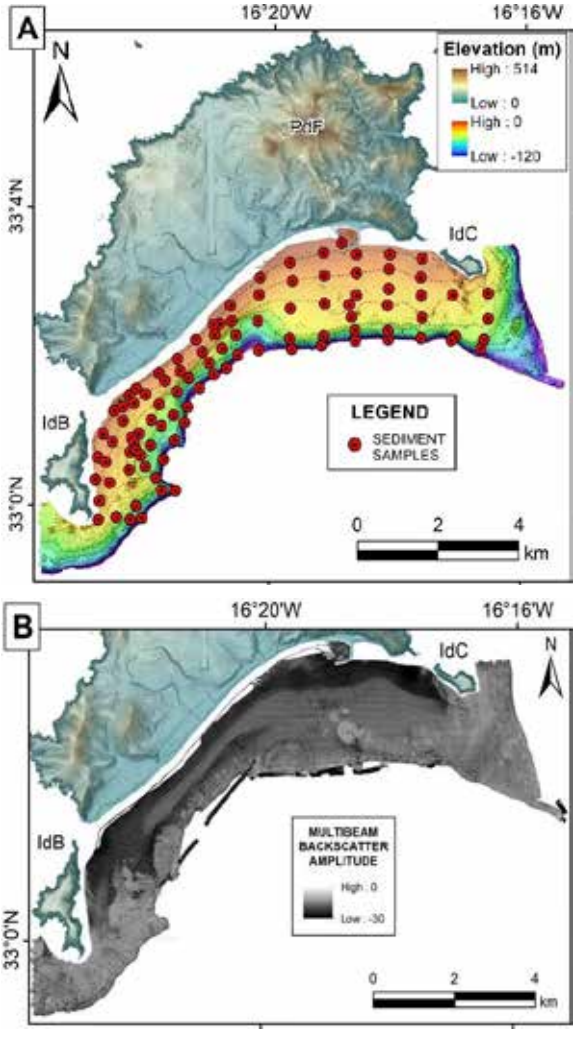


Fig. 2. A) DTM of Porto Santo Island and southern insular shelf multibeam bathymetry (2 m resolution). Black dashed lines are bathymetric lines spaced every 5 m. The red dots represent the position of each sediment sample collected from the seafloor. B) Multibeam backscatter mosaic used in this study (lighter tones represent high backscatter and darker tones low backscatter in dB).

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Sediments grain-size distribution

The sediments on the shelf are mostly well sorted sands with carbonate skeletal particles, but locally some samples have small or rarely abundant fractions of gravel, which are mainly represented by nodules of crustose coralline algae (rhodoliths) with spherical and densely branched shapes (Fig. 3).

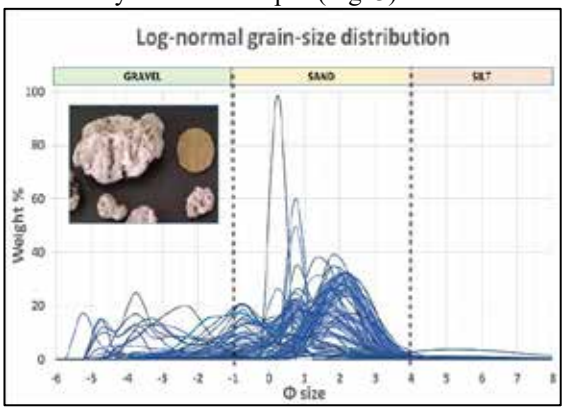


Fig. 3. Grain-size distribution curves of the seafloor samples. The inset shows some rhodoliths.

The variation of backscatter strength of the seafloor is mostly dictated by the micro-relief and the material properties of the substrate in the insonified area (Blondel, 2009). Therefore, it should be possible to use that information, integrated with the sediments grain-size, for remote classification of the seafloor nature. Our classification (Fig. 4, Table I) showed that light tones (higher amplitude/backscatter) correspond to rocky outcrops or to sandy gravel samples (< -1 ϕ); medium tones mostly correspond to medium to coarse sand samples (0 to 2 ϕ); and dark tones (less amplitude/backscatter) to well sorted fine sands (> 2.00 ϕ). The shelf seafloor shows a slightly seaward deepening coarsening trend (Fig. 5A).

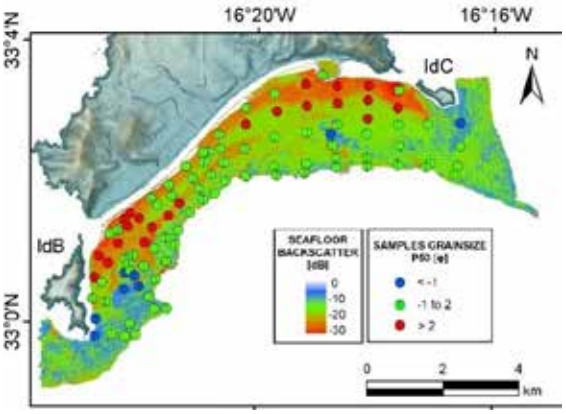


Fig. 4. Integrated map of multibeam backscatter and sediment samples.

Tab. i. Classification of the seafloor nature based on multibeam backscatter and sediment grain-size.

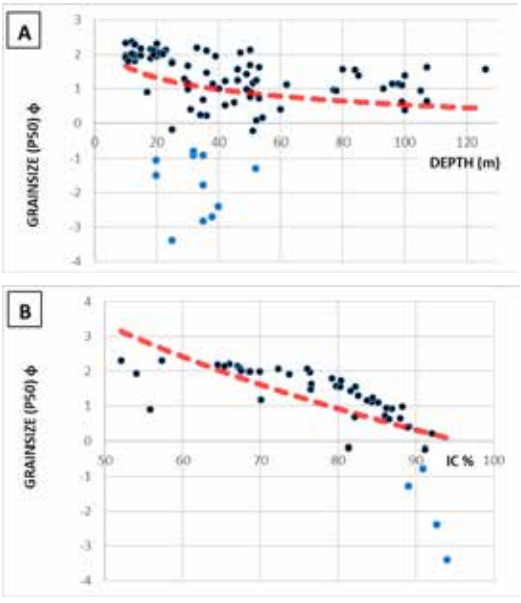
Seafloor backscatter – sediments grainsize integrated analysis			
Backscatter strength [dB]	**Tones of grey**	**Sediments grainsize (P50)**	**Seafloor nature classification**
0 to -10	light	--	*Rocky outcrops*
		< -1 φ	*Sand with gravel*
-10 to -20	medium	-1 to 2 φ	*Coarse and medium sand*
-20 to -30	dark	> 2.00 φ	*Fine sand*

4.2. Carbon content analysis

The analysis of the carbonate fraction was carried out on half of the collected samples and showed high percentages of total carbon (TC > 50%) all over the shelf. The presence of organic carbon is very low (OC < 10%), in favor of a greater presence of the inorganic component (IC). The highest IC (> 90%) matches the sandy gravel samples, while lower IC% match lower grain-size samples (Table II, Fig. 5B). Consequently, the seaward coarsening trend is reflected by also a seaward increasing of inorganic carbon content (Fig. 5C). The same trend has been also recognized on the shelves of other volcanic ocean islands (Santa Maria Island, Zhao et al., 2022). Gravels (rhodoliths) do not follow the grain-size-depth relationship (light blue dots in Figs. 5A, B and C). For OC% we did not find any obvious correlation.

Tab. ii. Carbon content integrated analysis.

Sediments grainsize classification	**Average IC** [%]	**Average OC** [%]
Sand with gravel	*91.92*	*4.31*
Medium and coarse sand	*80.33*	*3.36*
Fine sand	*65.56*	*3.77*



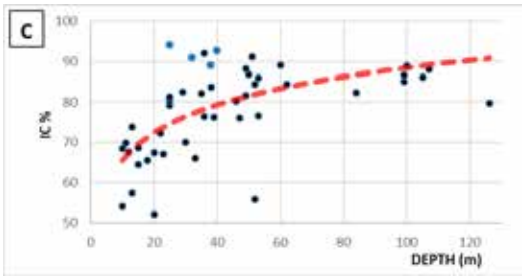


Fig. 5. A) Sediments P50 grain-size against water depth; B) Sediments P50 grain-size against IC%; C) Sediments IC% against water depth. The dots represent the samples (light blue dots have rhodoliths and the red dashed lines represent trend lines).

4.3. Nature of the sediments

Shelves surrounding volcanic islands usually host sediments that mostly result from subaerial erosional processes (stream and cliff erosion), with minor contributions from explosive volcanism and carbonate skeletal particles (Quartau et al., 2012). However, the sampling on Porto Santo has shown high percentages of bioclasts in sediments (~78%), both on the beach and on the shelf. We exclude material from explosive volcanism because the island has been extinct long ago. Bioclasts can consist on shells of dead organisms from the present-day shelf primary production (well coloured or whitish tones; ~54%), or material recycled from the subaerial aeolianites (yellowish tones; ~24%). Bioclasts from erosion of the aeolianites are mostly represented by small grain-sizes (> 0 ϕ) as result of the wind-blow selection.

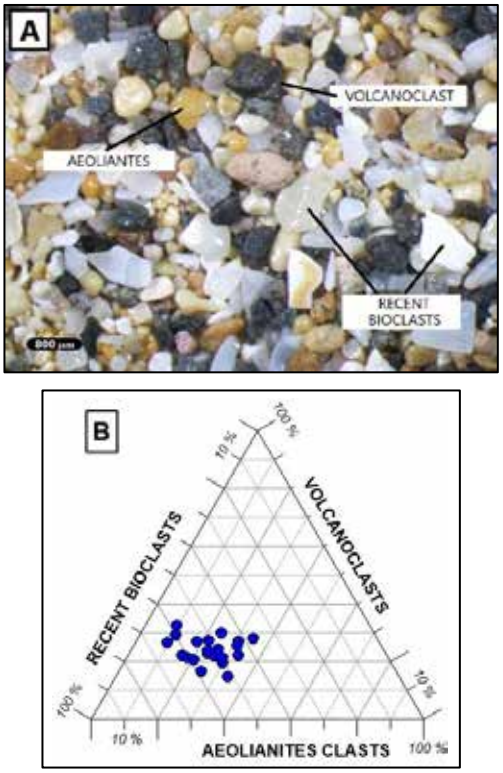


Fig. 6. A) Binocular microscope image of the sediments (> 0 ϕ) from Porto Santo beach and B) clasts ternary diagram (Volcanoclasts-Aeolianites-Recent bioclasts).

Moreover, the subaerial erosion rates (Table III) estimated by Silva, et al. (2019) are not compatible with the volume of sediments present on the shelf (12,6 x 10^{-2} km^3). A simple calculation has been done by multiplying the annual contribution by 18000 years (the LGM), since the sediments on the shelf are emplaced as transgressive and highstand deposits (Innocentini et al., 2022). The data (Tab. 3) shows that the present-day volume of sediments on the shelf is ~30% higher than those estimated by subaerial erosion. This discrepancy suggests that either subaerial erosion rates are underestimated or there is a significant present-day shelf primary carbonate production. Our characterization of the sediments with binocular microscope supports the last hypothesis. In high and volcanic active Islands, such as Faial in the Azores archipelago, sediments on the shelves are mostly of volcaniclastic origin (Quartau et al., 2012). More rain, higher cliffs (when they fail, produce more sediments) and volcanism all contribute to dilute the influence from the carbonate factory. On the contrary, more arid, lower altitude and volcanically inactive islands like Porto Santo and Santa Maria Islands (Zhao et al., 2022) have a lower contribution of volcaniclastic sediments to the shelf. Thus, the contribution of the carbonate factory has a bigger role on these islands than once thought. Therefore, terrigenous sediments are mostly restricted to the nearshore and there is an increasing trend of bioclastic sediments as we move offshore produced by a temperate carbonate factory as suggested by Hesemann (2016) and reproduce by this dataset.

Tab. iii. Comparison between the volume of sediments calculated using the subaerial erosion rates estimated by Silva, et al. (2019) with the volume of sediments present on the shelf (Innocentini et al., 2022).

Subaerial erosion			Present-day sediments	Difference	
Rates [m^3/year]	Time [years]	Volume [km^3]	Volume [km^3]	Volume [km^3]	Volume [%]
5000	18000	9 x 10-2	12,6 x 10-2	3,67 x 10-2	28,97

5. CONCLUSIONS

The aim of this study was to characterize the present-day sedimentary environment on the southern shelf of Porto Santo Island, through the integration of the backscatter mosaic with the grainsize and carbon content of the collected seabed samples. The results show that the backscatter amplitudes are compatible with the grain-size intervals of the samples. In addition, the binocular characterization of the sediments shows that a significant present-day shelf primary carbonate production dominates over the terrigenous particles, something that was unexpected.

REFERENCES

Blondel, P. (2009). *The Handbook of Sidescan Sonar*. Springer-Praxis, Chichester, UK.

Ferreira, M.P. & Neiva, J.C. (1996). Carta Geológica de Portugal, Folha de Porto Santo à escala 1:25000, Universidade de Coimbra/Instituto Geológico e Mineiro.

Folk, R.L., Ward, W.C. (1957). Brazos River bar - a study in the significance of grain size parameters. *Journal Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.

Fortes, C., Coli, A.B., Neves, M.G. & Capitao, R. (2006). Porto Santo Island: Offshore wave characterization and propagation. *Journal Coastal Research*, 39, 1600-1605.

Hesemann, F., 2016. Sedimentary Regime Shift in the Evolution from Volcano Islands to Seamounts (Madeira Archipelago, NE-Atlantic). Unpublished MSc thesis, Univ. Bremen.

Innocentini, S., Quatau, S., Casalbore, D., Roque, C., Vinhas, A., Santos, R. & Rodrigues, A. (2022). Morpho-stratigraphic characterization of the southern shelf of Porto Santo Island (Madeira Archipelago): Insights for small-scale instability processes and post-LGM sedimentary architecture. *Marine Geology*, 444, 106729.

Instituto Hidrográfico (2008). Caracterização dos depósitos sedimentares da plataforma insular sul da Ilha de Porto Santo. REL.TF.GM.01/08. Instituto Hidrográfico, Lisboa, Portugal, p. 78.

Quartau, R., Tempera, F., Mitchell, N.C., Pinheiro, L.M., Duarte, H., Brito, P.O., Bates, R. & Monteiro, J.H. (2012). Morphology of the Faial Island shelf (Azores): the interplay between volcanic, erosional, depositional, tectonic and mass-wasting processes. *Geochemistry Geophysics Geosystems,* 13, Q04012.

Silva, A.N., Taborda, R., Andrade, C. & Ribeiro, M. (2019). The future of insular beaches: Insights from a past-to-future sediment budget approach. *Science of the Total Environment*, 676, 692-705.

Zhao, Z., Mitchell, N.C., Quartau, R., Moreira, S., Rusu, L., Melo, C.S., Avila, S.P., Das, D., Afonso, P., Pombo, J., Duarte, J. & Rodrigues, A. (2022). Wave influenced deposition of carbonate-rich sediment on the insular shelf of Santa Maria Island, Azores. *Sedimentology,* 69.

A morphometric database of submarine landslides offshore Portugal

D. Gamboa (1,2), R. Omira (1,2), P. Terrinha (1,2)

(1) Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P. (IPMA), Rua C ao Aeroporto, 1749-077 Lisboa, Portugal. Email: davide.gamboa@ipma.pt.

(2) Instituto D. Luiz – IDL; Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, Edifício C8, Piso 3, 1749-016 Lisboa, Portugal.

Abstract: Submarine landslides are ubiquitous geohazards in marine environments occurring at multiple scales. Increasing efforts have been made to catalogue and categorise submarine landslides in comprehensive databases, aiming to better understand their preconditioning and trigger factors. However, studies on submarine landslides offshore Portugal are limited, but now it is crucial and timely to close this knowledge gap. Under the MAGICLAND project we undertook a detailed investigation of submarine landslides offshore Portugal, having produced an open-access dataset with the location and morphometry of over 1550 seafloor occurrences. This work brings new insights on submarine landslide distribution in the understudied west and southwest Iberian continental margin, complementing previous inventories made for nearby regions, and provides data relationships with wider applications for submarine landslide databases.

Key words: geohazards, landslide distribution, landslide morphometry, marine geology, submarine landslides.

1. INTRODUCTION

Submarine mass movements are common occurrences on marine domains, from the shallow coasts to the deepest areas of the oceans (Hampton *et al.*, 1996). Outstanding massive deposits attract the attention for detailed studies, while regions where hundreds or thousands of smaller-scale landslides occur are often overlooked due to poor coverage by, or poor resolution on, bathymetric and subsurface data (Chaytor *et al*., 2009). Recognising submarine landslide extents has further political implication as these are used to set international ZEE boundaries under the definition of the UN Convention on Law of the Sea (Mosher *et al*., 2016).

An increasing number of efforts has been made to compile databases of submarine landslides aimed to better understand their distribution and morphometry on marine settings around the world (Clare *et al*., 2019). However, extensive studies are still limited in many margins. This work shows results from the MAGICLAND database (Gamboa *et al*. 2021, 2022), a compilation of geomorphological data of 1552 morphological scars and submarine landslides offshore Iberia, with the goal to analyse their distribution and morphometry, and how these vary within seven offshore geomorphologic domains.

2. METHODS

The mapping of scars and landslide features was based on the 2018 version of Tile F3 of the EMODnet DTM for European seas, set on a general 1/16 x 1/16 arc minutes grid. Landslide morphometric mapping followed criteria from Clare *et al*. (2019). Each landslide feature was identified with a unique reference ID to which all morphometric parameters recorded as point, line or polygon shapefiles were associated. Specifically, point features identify the location of each slide using an XYD (Latitude, Longitude, Depth) reference; line features were used to trace the scar limit, and landslide length and width; and polygon features to delimit the landslide perimeter. Volume was estimated using the bathymetry raster as the lower input surface and a new DEM created to represent the pre-landslide morphology (i.e., without the scars) as the top surface.

3. SUBMARINE LANDSLIDE DISTRIBUTION

The 1552 submarine landslides in the database were grouped into subsets for seven offshore geomorphological domains (Figure 1a), namely: D1) Submarine Canyons (n = 232), which include the broadly E-W oriented Nazaré, Cascais, Lisboa and Setúbal canyons on the western slope, and the S-SW oriented S. Vicente, Lagos and Portimão Canyons on the southern slope; D2) Estremadura Spur (n = 38); D3) broader Gulf of Cadiz (GoC) (n = 226), comprising irregular morphologies within the GoC accretionary wedge and slope; D4) GoC Banks (n = 123), an elongated region immediately adjacent to the southern slope, which includes E-W trending channels flanking large banks; D5) a general Distal Domain (n = 263), comprising numerous submarine

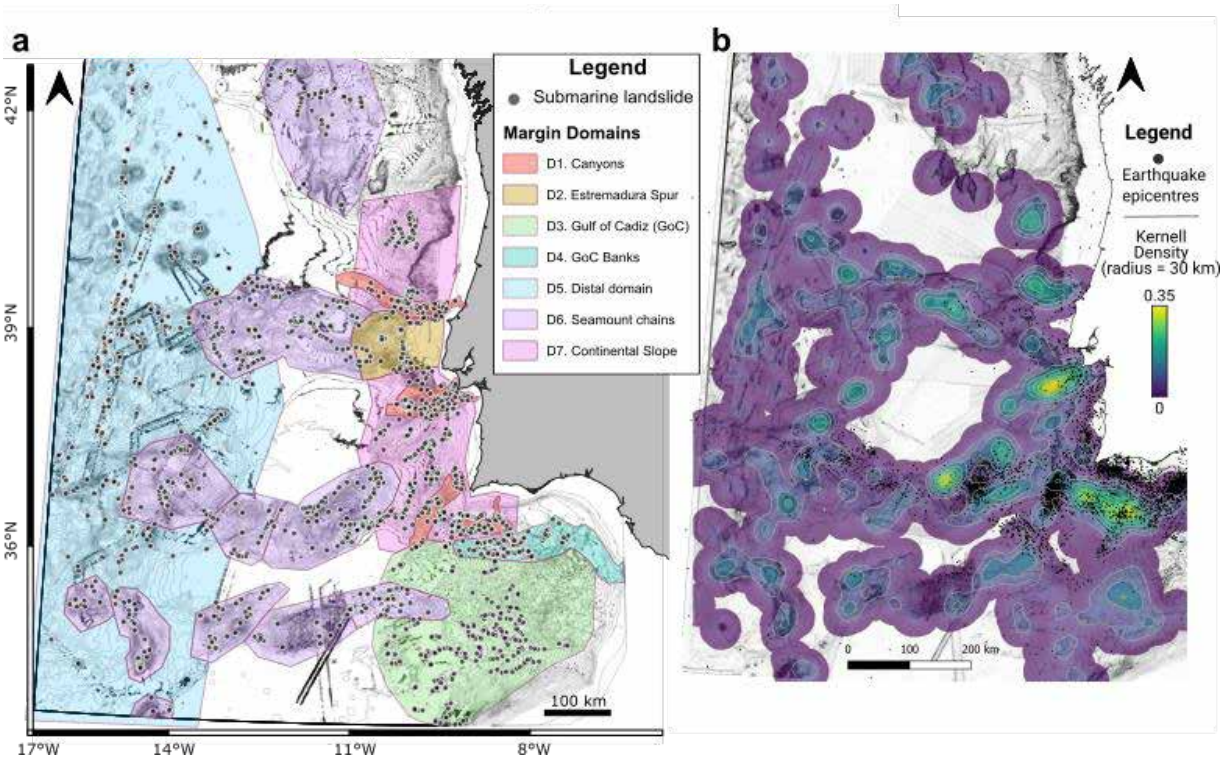


Fig. 1. ***a****) Map of the study area depicting the submarine landslide occurrences and limits of the offshore domains.* ***b****) Kernell density map of the submarine landslide distribution, calculated using a radius of 30 km from each landslide limit.(modified from Gamboa et al. 2021, 2022).*

ridges and seamounts of variable size and shape on the western regions of the study area, including the Madeira-Tore Rise; D6) Seamount Chains (n = 437), including the major submarine seamounts rising over 1000s of metres from the abyssal plains; D7) Continental Slope (n = 233), which covers the extent of Portugal´s continental slope, except where intersected by Domains 1 and 2. Regions where landslides were not observed on the data, namely the continental shelf and flat abyssal plains, were not included as domains (grey areas in Figure 1).

The spatial distribution of submarine landslides is non-uniform. The Kernell density map illustrates that landslide occurrences on and along areas of the offshore are ruled by the presence of submarine relief, with prevalence on or close to the continental slope (Figure 1b). High densities of landslides on the margin are associated to submarine canyons. On the southern margins, high densities result from the combination of slope failures along the canyons (D1) and the GoC Banks (D4). Major landslide clustering occurs also on the flanks of seamounts and elongated ridges (Figure 1b).

4. LANDSLIDE MORPHOMETRY

The average length and width values range between 2.5 to 4 km, not changing drastically across the domains (Figure 2). However, the recorded outlier values illustrate the high range of values of these parameters and the magnitude of mass-failure across domains, with the larger and wider ones occurring on the deeper Domains 5 and 6 (Figures 1, 2a and 2b). Higher variability of the morphometric parameters across domains is represented by the landslide area and volume (Figure 2c and 2d). The larger landslides occur on the deeper Domains 5 and 6, while the smaller ranges are observed on the Gulf of Cadiz (Domains 3 and 4).

Scale relationships between length, width, area, and volume of the full data sample have been calculated to assess predictive trends for submarine landslide morphometry (Figure 3). The length-width relationships generally show the lower correlations. Graphically, this is expressed by the marked scatter of the data along the whole the trend line (Figure 3a), even towards regions with lower frequencies of observations. Other parameter pairings that do not yield optimal R^2 values are length or width relationships with volume, with coefficients of 0.72 and 0.63, respectively (Figures 3).

Improved relationships were obtained between the landslide area and remaining parameters. Area-length power-law relationships yield $R^2 = 0.85$ (Figure 3b), while area-width and volume-area both show $R^2 = 0.80$ (Figures 3e and 3f). However, volume-area relationships show higher scatter from the trend line for area values below 50 km^2, where there is a higher mix of features from all domains, which likely compromises the correlation value. Above 50 km^2, a better fit of the data to the trend is observed, particularly for Domains 5 and 6 where the larger landslides occur (Figure 3f).

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Seven geomorphologic domains were established in the Portuguese offshore to analyse the distribution and morphometry of 1552 mapped submarine landslides (Figure 1). The higher densities of submarine landslides occur on the tectonically active Southwestern Iberian Margin (Figure 1b), an area known for relevant seismicity and numerous recorded earthquake epicentre clusters (Terrinha *et al*., 2003). Other major areas registering high landslide densities are within submarine canyons where numerous collapses occur on their flanks and mouth. Nevertheless, submarine landslides were widely identified on the flanks of most bathymetric features in all domains (Figure 1). The largest landslides occur on the deeper domains (Figures 2 and 3) where seamounts hundreds or thousands of metres tall prevail. The Gulf of Cadiz records many of the smaller landslide occurrences (Figure 2 and 3), yet these occur in high frequencies and over wide regions, namely to the southeast of the study area atop the GoC accretionary wedge (Figure 1b).

Determining the power-law relationships between the descriptive parameters is useful not only to analyse this dataset, but also enables its comparison to other submarine landslide compilations based on similar methods (Chaytor *et al*., 2009; Urgeles and Camerlenghi, 2013; Moscardelli and Wood, 2016; Blahůt *et al*., 2019). The standardization of analysis techniques is thus necessary for the best possible integration of different datasets (Clare *et al*., 2019). Our results indicate that relationships involving the area provide stronger correlations (Figure 3), a finding common to other studies (Moscardelli and Wood, 2016; Blahůt *et al*., 2019). Thus, unidimensional parameters such length and width are poorer predictive tools to estimate submarine landslide morphologies compared to 2D (area) and 3D (volume) ones.

Acknowledgements

The work was funded by the Portuguese Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) I.P./MCTES project MAGICLAND - MArine Geo-hazards InduCed by underwater LANDslides in the SW Iberian Margin (Ref: PTDC/CTA-GEO/30381/2017), and through national funds (PIDDAC) – UIDB/50019/2020. We acknowledge the support provided by IPMA´s SeisLab and by the C4G project.

REFERENCES

Blahůt, J., Balek, J., Klimeš, J., Rowberry, M., Kusák, M., Kalina, J., (2019). A comprehensive global database of giant landslides on volcanic islands. *Landslides*, 16, 2045–2052.

Chaytor, J.D., ten Brink, U.S., Solow, A.R., Andrews, B.D., (2009). Size distribution of submarine landslides along the U.S. Atlantic margin. *Marine Geology*, 264, 16–27.

Clare, M., Chaytor, J., Dabson, O., Gamboa, D., Georgiopoulou, A., Eady, H., Hunt, J., Jackson, C., Katz, O., Krastel, S., Léon, R., Micallef, A., Moernaut, J., Moriconi, R., Moscardelli, L., Mueller, C., Normandeau, A., Patacci, M., Steventon, M., Urlaub, M., Völker, D., Wood, L., Jobe, Z.R., (2019). A consistent global approach for the morphometric characterization of subaqueous landslides, *in*: Lintern, D.G., Mosher, D., Moscardelli, L., Bobrowsky, P.T., Campbell, C., Chaytor, J.D., Clague, J.J., Georgiopoulou, A., Lajeunesse, P., Normandeau, A., Piper, D.J.W., Scherwath, M., Stacey, C., Turmel, D. (Eds.), *Subaqueous Mass Movements and Their Consequences: Assessing Geohazards, Environmental Implications and Economic Significance of Subaqueous Landslides*. Geological Society, London, Special Publications 477, pp. 455–477.

Gamboa, D., Omira, R., Terrinha, P., (2021). A database of submarine landslides offshore West and Southwest Iberia. *Scientific Data*, 8, 185.

Gamboa, D., Omira, R., Terrinha, P., (2022). Spatial and morphometric relationships of submarine landslides offshore west and southwest Iberia. *Landslides* 19, 387–405.

Hampton, M.A., Lee, H.J., Locat, J., (1996). Submarine landslides. *Reviews of Geophysics*, 34, 33–59.

Moscardelli, L., Wood, L., (2016). Morphometry of mass-transport deposits as a predictive tool. *Geological Society of America Bulletin,* 128, 47–80.

Mosher, D.C., Shimeld, J.W., Hutchinson, D.R., Jackson, H.R., (2016). Canadian UNCLOS extended continental shelf program seismic data holdings (2006–2011). Geological Survey of Canada, Open File 7938.

Terrinha, P., Pinheiro, L.M., Henriet, J.P., Matias, L., Ivanov, M.K., Monteiro, J.H., Akhmetzhanov, A., Volkonskaya, A., Cunha, T., Shaskin, P., Rovere, M., (2003). Tsunamigenic-seismogenic structures, neotectonics, sedimentary processes and slope instability on the southwest Portuguese Margin. *Marine Geology,* 195, 55–73.

Urgeles, R., Camerlenghi, A., (2013). Submarine landslides of the Mediterranean Sea: Trigger mechanisms, dynamics, and frequency-magnitude distribution. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118, 2600–2618.

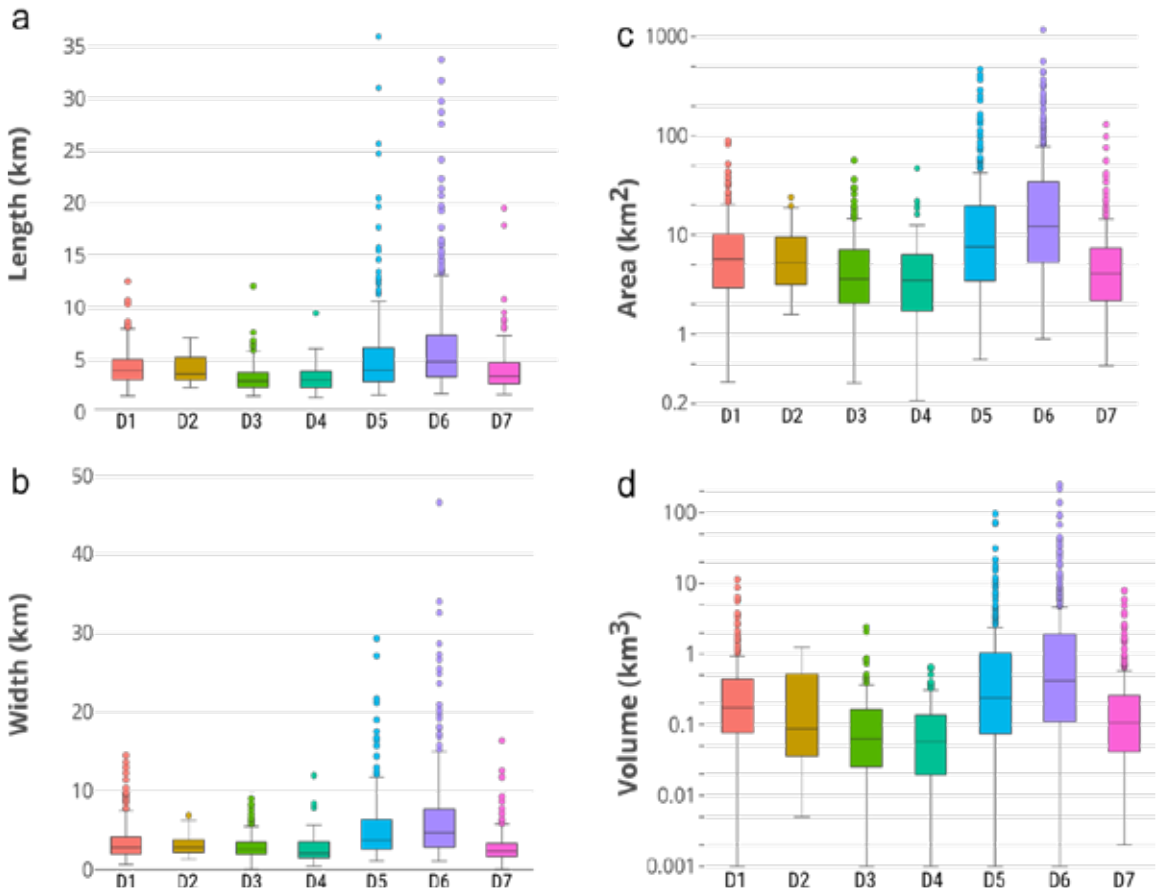


Fig. 2. Boxplots of the submarine landslide´s Lenght, Width, Area and Volume (modified from Gamboa et al. 2022).

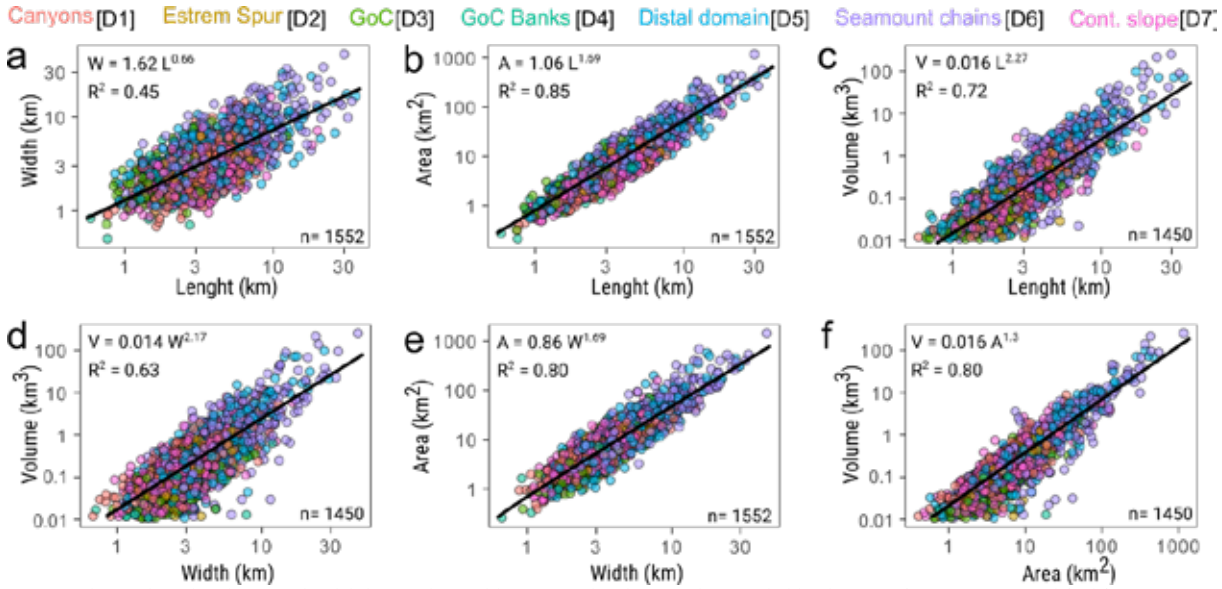


Fig. 3.Relationship plots between landslide Lenght, Width, Area and Volume, colour-coded by domain of occurrence (modified from Gamboa et al., 2022)

Short- to medium-term beach dynamics of a northern-Portuguese coastal stretch: impact of local features, wave and wind actions

A. Bio (1), J. A. Gonçalves (1,2), I. Iglesias (1), H. Granja (1), J. Pinho (3), L. Bastos (1,2)

(1) Interdisciplinary Centre of Marine and Environmental Research (CIIMAR/CIMAR), University of Porto, Portugal. *anabio@ciimar.up.pt

(2) Department of Geosciences Environment and Spatial Planning, Faculty of Sciences of the University of Porto, Portugal.

(3) Centre of Territory, Environment and Construction (CTAC), Department of Civil Engineering, University of Minho, Braga, Portugal.

Abstract: Many coasts suffer from prevailing erosion and are vulnerable to climate change impacts, threatening coastal ecosystems and populations. Understanding coastal morpho-sedimentary dynamics is thus essential. However, coastal vulnerability may differ locally, depending on exposure to wave conditions and local geological and morpho-hydrodynamical features, suggesting a local approach to monitoring and management. Digital elevation models of the Vila Nova de Gaia coast, from aerial surveys obtained between November 2008 and February 2019, were analysed to quantify changes in shoreline position and sediment budgets for the whole study area and for distinct coastal segments. Overall and for a decade, the beach-dune system slightly increased in volume, although the shoreline retreated. Interannual and seasonal patterns were very variable, likely depending on the meteo-oceanic conditions of each period. Locally, the study area presented stretches with relatively stable morphology, and others with erosional or accretional trends, which were related to beach type, shoreline orientation and the presence of defence structures.

Keywords: beach types, coastal morpho-sedimentary dynamics, erosion/accretion, meteo-ocean effects, remote sensing.

1. INTRODUCTION

Coastal erosion is a problem affecting more than 20% of the European and 30% of the Portuguese coastline (European Communities, 2004) and this problem is expected to worsen with the projected climate change impacts, such as sea level rise (Vousdoukas *et al.*, 2020). Most coasts and estuarine margins are densely populated and modified, which increases their vulnerability and changes natural sedimentary and hydrodynamic patterns. There is a sustained sediment deficit caused by human actions that disrupt sediment fluxes and retain sediments in reservoirs and other structures. This has serious consequences for coastal as well as inland ecosystems, infrastructures and populations, which become increasingly exposed to wave action, land loss and flooding (Pollard *et al.*, 2019).

To mitigate erosion and its effects, coastal defence has become an important strategy of coastal management. Hard structures, such as groynes, seawalls and breakwaters, were implemented to protect vulnerable areas. But, also given the insufficient sediment availability, these often can produce unwanted effects, particularly a downdrift erosion. Therefore, coastal defence has shifted in recent decades towards soft and nature/based coastal protection solutions, such as beach nourishment, dune stabilization with fences and vegetation, and bioengineering (Turner *et al.*, 2007; Lima *et al.*, 2020).

To optimize coastal management, the morphology and its dynamics, and the factors affecting them, namely human interventions, oceanographic conditions, river flow and weather conditions, as well as sediment availability and supply, need to be understood. And, they need to be understood at a local scale, as coastal vulnerability and risks differ locally, depending on geomorphological features (geology, orientation and exposure), meteorological, oceanographic and river conditions (wave, wind and river impacts), local sediment supply and anthropogenic factors (buildings, infrastructures, defence structures, sand extraction) (Lemke and Miller, 2021).

This work presents a local approach to coastal monitoring. A series of Digital Elevation Models of the Vila Nova de Gaia coast was analysed to assess spatial as well as temporal patterns and variability. Sediment budgets and shoreline changes were subsequently examined for possible relationships with: meteo-ocean conditions (i.e. wave height and direction and wind velocity and direction); effects of local geological features (i.e. coast types: sandy, rocky); and the presence of hard defence structures (a groyne and a breakwater).

2. STUDY AREA

The study area comprises the coast of the Vila Nova de Gaia municipality, in northern Portugal. This 14 km long, densely populated coastal stretch is characterized by predominantly sandy beaches with rocky outcrops, presenting rocky shores in its northern part, next to the Douro river mouth. There is also a groyne and a breakwater, which was meant to be detached but developed a tombolo during construction, connecting it to the coast (Granja *et al.*, 2010). The beaches in the south, near Espinho, have been managed with repeated artificial beach nourishment (Pinto *et al.*, 2020). This coast is exposed to the highly energetic Atlantic Ocean conditions, with mean significant wave heights of 2-3 m offshore, and mean wave periods of 8-12 s (Viitak *et al.*, 2021).

3. DATA

Digital elevation models (DEMs) were obtained through photogrammetry from aerial photography campaigns carried out on November 14th 2008, April 23rd and November 11th 2009, May 5th 2010, May 17th 2018 and February 20th 2019, during spring low tides. The images, with ground sampling distances of 10 to 13 cm, were processed using the Agisoft software to obtain DEMs with 1m resolution and accuracies in the order of 10 cm (Gonçalves *et al.*, 2018; Agisoft, 2022).

Average significant heights (Hs) and wave peak directions for 3 hours intervals were obtained from a DATAWELL directional wave buoy located about 32 km NW of the study area, off the coast of Leixões harbour (41°19.00' N, 008°59.00' W), at 83 m water depth (processed data kindly supplied by the Portuguese Hydrographical Institute, IH; https://www.hidrografico.pt). Hourly wind velocities (in m/s) and wind directions were computed based on climate variable estimations from the ERA5-Land reanalysis dataset (Muñoz Sabater, 2019).

4. ANALYSES

DEMs were analysed in a GIS tool (using ArcGIS 10.6 and its Spatial Analyst and 3D Analyst modules) to obtain volumes of the beach-dune system and the shoreline position for each survey date. Changes in volume and shoreline position (using the line 1 m above mean sea level as shoreline indicator) were computed for the periods between surveys (Figure 1). Sediment budgets and shoreline migration were determined for the whole study area as well as locally, per coast sector. For the local analyses, the coastal stretch was divided into segments (according to shoreline orientation), based on 1 m line (above mean sea level) of the first DEM, which was simplified using the Douglas-Peucker simplification algorithm (Douglas and Peucker, 2011; Bio *et al.*, 2022).

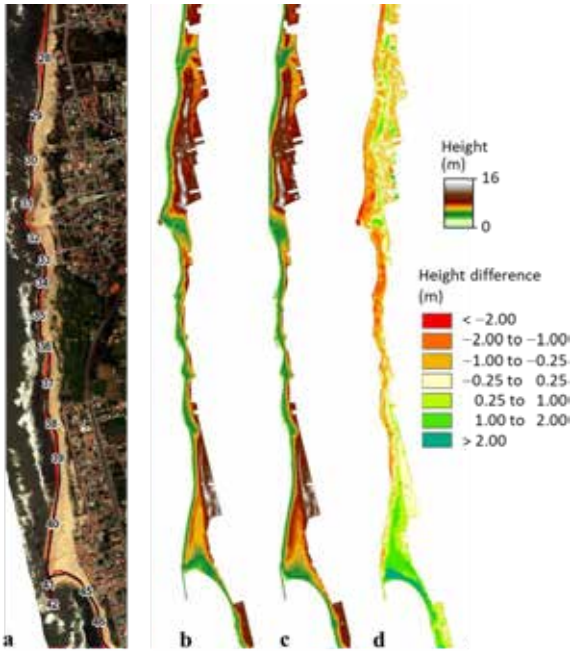


Fig. 1. Coastal morphology and morphodynamics: a part of the February 2019 survey orthomosaic (a), with the simplified 1-m line and respective segments (the Aguda breakwater, segments 42 and 43 in the south), the DEMs for April 2009 (b) and February 2019 (c), and the height differences between these two DEMs (d).

5. RESULTS AND DISCUSSION

During the first winter period, between November 2008 and April 2009, a marked overall accretion was observed, with the beach-dune volume increasing by 2.9% and the shoreline prograding 2.7 m (Table i). Subsequently, the coast shifted from accretional to stable or erosional conditions, with a negative sediment budget (−1.1%) for the last year (May 2018–February 2019). Considering the decadal period between April 2009 and February 2019, the volume of the beach-dune system increased by 0.6%, however with a mean shoreline retreat of 1.6 m. A high interannual and seasonal variability was observed, likely driven by the meteo-oceanic conditions that occurred during each period.

Table i. Changes in beach-dune system volume and in shoreline position, between consecutive surveys.

Time period	Δ Beach-dune volume	Δ Shoreline position
November 2008–April 2009	2.9%	2.7 m
April 2009–November 2009	1.4%	0.7 m
November 2009–May 2010	–0.1%	1.2 m
May 2010–May 2018	0.5%	–3.6 m
May 2018–February 2019	–1.1%	0.2 m

There was a marked seasonal variability, e.g. between the two winter periods analysed, as well as inter-annual variability, with more accretional conditions

for the years in the beginning of the time series and more erosional conditions during the last year.

Locally, the study area presented stretches with relatively stable morphology, and others with erosional or accretional trends (Figure 2). Three main zones can be distinguished. Considering, for instance, the decade between April 2009 and February 2019, the northern zone (segments 1–7) was relatively stable in terms of beach/dune volume and shoreline position. This area is characterized by rocky shores, which tend to be more stable. A large predominantly erosional zone follows in the middle (segments 8–39), composed of sandy beaches with rocky outcrops, more or less exposed to ocean waves, which are predominantly from the NW (Figure 3). In the south, marked accretion was identified in segments 40 to 52. This zone is downdrift of the Aguda breakwater (located between segments 40 and 43), which provides some protection from ocean waves, favouring sediment deposition. Furthermore, there have been repeated artificial beach nourishments at the most southern beaches, near Espinho.

As expected, protected or embayed segments tended to show less erosion and shoreline retreat than exposed segments. The effects of the groyne (between segments 13 and 15) varied along time, with periods of erosion and periods of accretion observed in the downdrift segments (15, 16).

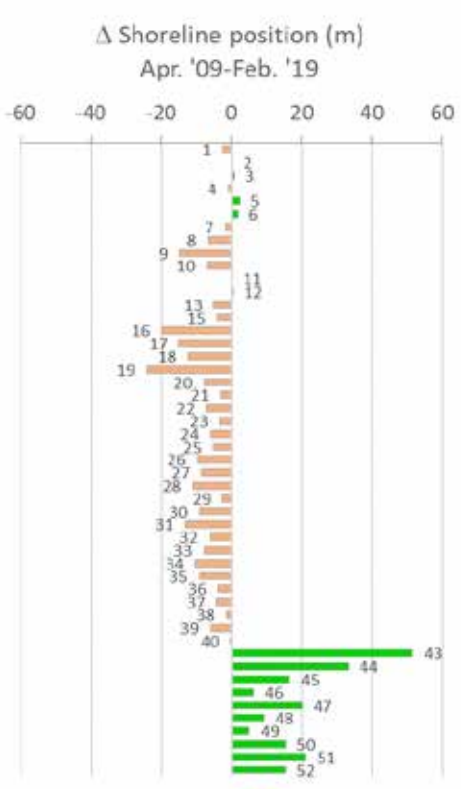


Fig. 2. Changes in shoreline position (in m) between April 2009 and February 2019, for the different segments of the analysed Vila Nova de Gaia coastal stretch. The segments are numbered from north to south (orange: shoreline regression, green: shoreline progradation).

Over the 10-year period rocky segments showed some variability, possibly due to the presence of sandy pockets, or imprecision of the DEMs. These segments lost on average 1.1 m^3 (±1.7 m^3) of volume per linear meter and did not change their shoreline position (change = 0.0 m ±1.7 m). Sandy segments lost 2.9 m^3 of volume per linear meter (±117.6 m^3) and retreated 3.4 m (±10.7 m).

Although results are very variable, erosion and shoreline retreat tended to be higher for westward oriented segments compared to north-westward oriented segments (Figure 3), with some segments (particularly the most southern segments of the study area) displaying marked accretion despite facing approximately west.

No clear relationships between morphodynamics and wind velocities and directions were found. Notice, that only the inter-tidal and emersed part of the shore was monitored. For a better assessment of coastal Morphodynamics, the morphology of the submersed shore should also be considered.

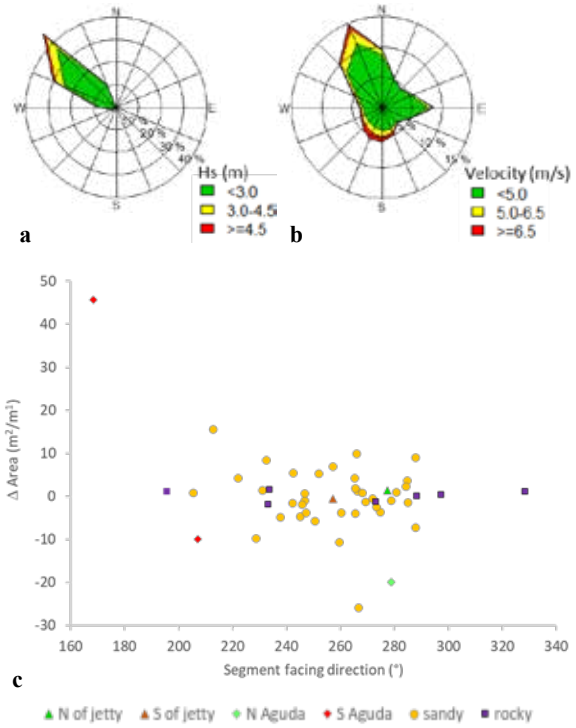


Fig. 3. Distribution of 3-hourly wave directions for three significant-wave-height classes (a) and of hourly wind directions for three velocity classes (b), and changes in area (in m^2 per linear meter of coast), per segment (c), between April 2009 and February 2019. Changes in area are plotted according to the direction the segment is facing and marked according to the segment type/location.

6. CONCLUSION

Morphodynamics of the Vila Nova de Gaia coast presented temporal (seasonal, yearly and decadal) as well as spatial variability. Different segments of the studied coast showed diverging morpho-sedimentary dynamics, which could be related to specific local

features interacting with meteo-ocean conditions. This stresses the importance for a local approach to coastal management and erosion risk assessment, which require implementation of monitoring programs that collect relevant information at temporal and spatial resolutions that are adequate to identify and quantify local patterns.

While, the studied area as a whole seems relatively stable, there is a large zone with erosional patterns. Furthermore, a trend towards erosion was observed for the studied period. This is worrying, particularly in light of the predicted sea-level rise due to climate-change. However, a consistent monitoring program and longer time series are needed to confirm if that trend remains consistent.

Acknowledgments

This research was partially supported by the Strategic Funding UIDB/04423/2020 and UIDP/04423/2020 through national funds provided by the FCT—Foundation for Science and Technology and European Regional Development Fund (ERDF). This work was further funded by the projects ATLANTIDA (ref. NORTE-01-0145-FEDER-000040) and Ocean3R (ref. NORTE-01-0145-FEDER-000064), both of which were supported by the North Portugal Regional Operational Programme (NORTE2020) under the PORTUGAL 2020 Partnership Agreement and through the European Regional Development Fund (ERDF). Data were supplied by the European Union MarRISK project: Adaptación costera ante el Cambio Climático: conocer los riesgos y aumentar la resiliencia (0262_MarRISK_1_E) through EP INTER-REG V A España-Portugal (POCTEP) program and the project INNOVMAR-Innovation and Sustainability in the Management and Exploitation of Marine Resources (NORTE-01-0145-FEDER-000035, within Research Line ECOSERVICES), supported by NORTE 2020, under the PORTUGAL 2020 Partnership Agreement, through the ERDF.

REFERENCES

Agisoft LLC. (2022). *Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.8*. Agisoft Metashape, Available online: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_8_en.pdf (accessed on 15 April 2022).

Bio, A., Gonçalves, J.A., Iglesias, I., Granja, H., Pinho, J., and Bastos, L. (2022). Linking Short- to Medium-Term Beach Dune Dynamics to Local Features under Wave and Wind Actions: A Northern Portuguese Case Study. *Applied Sciences*. 12(9), 4365. https://doi.org/10.3390/app12094365

Douglas, D.H., and Peucker, T.K. (2011). Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or its Caricature. In Classics in Cartography, M. Dodge (Ed.). https://doi.org/10.1002/9780470669488.ch2

European Communities (2004). *Living with Coastal Erosion in Europe–Sediment and Space for Sustainability*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Gonçalves, J.A., Bastos, L., Madeira, S., Magalhães, A., and Bio, A. (2018). Three-dimensional data collection for coastal management–efficiency and applicability of terrestrial and airborne methods. *Int. J. Remote Sens.*, 39, 9380–9399. https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1523591.

Granja, H., Bastos, L., Pinho, J., Gonçalves, J., Henriques, R., Bio, A., and Magalhães, A. (2010). *Small Harbours Risks: Lowering for Fishery and Increasing Erosion. The Case of Portinho da Aguda (NW Portugal)*; Littoral 2010, EDP Sciences, Les Ulis, France, p. 09003. https://doi.org/10.1051/litt/201109003.

Lemke, L., and Miller, J.K. (2021). Role of storm erosion potential and beach morphology in controlling dune erosion. *J. Mar. Sci. Eng.*, 9, 1428. https://doi.org/10.3390/jmse9121428.

Lima, M., Coelho, C., Veloso-Gomes, F., and Roebeling, P. (2020). An integrated physical and cost-benefit approach to assess groins as a coastal erosion mitigation strategy. *Coast Eng*, 156, 103614. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103614

Muñoz Sabater, J. (2019). *ERA5-Land Hourly Data from 1981 to Present.* Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), Sherfield, UK, 2019. 10.24381/cds.e2161bac

Pinto, C.A., Silveira, T.M., and Teixeira, S.B. (2020). Beach nourishment practice in mainland Portugal (1950–2017): Overview and retrospective. *Ocean Coast. Manag.*, 192, 105211. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105211.

Pollard, J.A., Spencer, T., and Brooks, S.M. (2019). The interactive relationship between coastal erosion and flood risk. *Prog. Phys. Geogr.*, 43, 574–585. https://doi.org/10.1177/0309133318794498.

Turner, R.K., Burgess, D., Hadley, D., Coombes, E., and Jackson, N. (2007). A cost-benefit appraisal of coastal managed realignment policy. *Glob. Environ. Chang.*, 17, 397–407. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2007.05.006.

Viitak, M., Avilez-Valente, P., Bio, A., Bastos, L., and Iglesias, I. (2021). Evaluating wind datasets for wave hindcasting in the NW Iberian Peninsula coast. *J. Oper. Oceanogr.*, 14, 152–165. https://doi.org/10.1080/1755876X.2020.1738121.

Vousdoukas, M.I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T.A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., and Feyen, L. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nat. Clim. Chang*, 10, 260–263. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0.

Importância dos parâmetros morfológicos na hidrodinâmica da praia da Vagueira

P. A. Silva (1), F. Sancho (2), F. S. B. F. Oliveira (2), F. Santos (3), P. Baptista (3), J. P. Pinto (4)

(1) CESAM & Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal. E-mail: psilva@ua.pt

(2) Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Av. Brasil, 1700 Lisboa. E-mail: fsancho@lnec.pt, foliveira@lnec.pt

(3) CESAM & Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal. E-mail: fabioacsantos@ua.pt, renato.baganha@ua.pt

(4) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas. E-mail: Paulo.Pinto@hidrografico.pt

Resumo: A presente comunicação descreve o conjunto de dados hidrodinâmicos adquiridos durante uma campanha realizada na praia da Vagueira nos dias 14 e 15 de outubro de 2019. As correntes e parâmetros de caracterização da agitação marítima foram medidos na zona entremarés e na praia submarina com vários equipamentos: correntómetros acústicos e eletromagnéticos, sensores de pressão e flutuadores lagrangeanos de superfície. Estas medições foram complementadas com imagens adquiridas por um sistema de vídeo-monitorização que permitiu localizar as linhas de costa e a zona de rebentação, e estimar a posição da barra submersa, paralela à praia, distanciada cerca de 100 a 200m da linha de costa. Os resultados mostram que a barra submersa e a maré determinam a posição da zona de rebentação. Na zona anterior à rebentação as correntes litorais são dominadas pelo vento e após a rebentação, até à zona de espraio, pelas correntes induzidas pelas ondas.

Palavras-chave: agitação marítima, flutuadores lagrangeanos, rebentação, vídeo-monitorização.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho enquadra-se no âmbito do "Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira" que foi efetuado pelo consórcio LNEC, UAVEIRO e IST para a Agência Portuguesa do Ambiente, I.P (Sancho *et al*., 2020). Nele são apresentados e analisados os resultados de uma campanha de campo que incluiu a aquisição de parâmetros hidrodinâmicos e morfológicos. Estes resultados contribuem para caraterizar a hidrodinâmica atual da zona de estudo, nas condições meteo-oceanográficas observadas.

2. METODOLOGIA

A campanha decorreu entre as 7h00 do dia 14 de outubro e as 12h00 do dia 15 de outubro de 2019 durante dois ciclos de maré na zona costeira frontal à Praia da Vagueira. A Figura 1 apresenta a área de estudo, com a definição dos domínios para aquisição dos dados de campo. Para a medição dos parâmetros hidrodinâmicos foram utilizados sensores de pressão (PT), correntómetros eletromagnéticos (EM) e acústicos (ADCP) e flutuadores lagrangeanos de superfície. Foram igualmente adquiridas imagens de vídeo através do sistema de vídeo-monitorização instalado para complementar as medições efetuadas.



Fig. 1. Polígono a verde indica o domínio para aquisição de dados hidrodinâmicos com a localização dos pontos (P1-P6) onde foram colocadas as estruturas de suporte dos instrumentos de medição (sensores de pressão e correntómetros eletromagnéticos) e os pontos ADCP1 e ADCP2 (correntómetros acústicos); o polígono vermelho representa o campo de visão do sistema de vídeo-monitorização instalado na frente urbana (ponto azul).

Os PT e EM foram instalados em estruturas fixas na zona entremarés: 6 PT *Level Troll* nos pontos P1-P6 e 2 EM *Infinity* nos pontos P2 e P6. Este conjunto de sensores adquiriram dados durante as preias-mar dos dias 14 e 15 de outubro a uma frequência de 2 Hz. As séries temporais da elevação da superfície livre e das componentes horizontais da velocidade medidas foram filtradas, de forma a separar as componentes de alta frequência, relacionadas com a ondulação, e de baixa frequência, relacionadas com a maré e correntes litorais, longitudinais e transversais à praia. Na praia

submarina foram fundeados dois correntómetros acústicos, um da *RDInstruments* (ADCP1) aos -10 m e um *Aquadopp Current Profiler* (ADCP2) aos -6 m (as profundidades estão referidas ao nível médio do mar, NMM). Os ADCP permitiram efetuar medições das correntes e dos parâmetros da ondulação. O ADCP2 foi configurado em modo de medição dos perfis de corrente durante 600 s (10 min) e modo "*wave burst*" (20 min) a cada 30 min. O ADCP1 foi configurado para medição em *bursts* de 20 min e extração de todos os parâmetros (correntes médias, parâmetros da agitação marítima, espetros direcionais) a partir dos dados medidos nesse intervalo.

Os flutuadores derivantes de superfície *Wavy Drifter Buoy* foram lançados e recolhidos com o auxílio de uma moto de água, por elementos do Instituto de Socorros a Náufragos e do Instituto Hidrográfico. Cada flutuador tem um sistema de posicionamento por GNSS, um sistema inercial (IMU) e um módulo de comunicação para receber em tempo real a informação adquirida, permitindo a monitorização contínua da sua localização e facilitando a sua recolha. Foram efetuados três lançamentos no dia 14 de outubro a sul da frente urbana da Praia da Vagueira conforme descrito na Tabela I. O processamento dos dados obtidos permitiu estimar a velocidade da corrente através da trajetória que os flutuadores efetuaram num determinado intervalo de tempo.

Tab. I. Lançamento dos flutuadores no dia 14 de outubro: hora inicial e final e número de flutuadores.

Lançamento	Hora inicial	Hora final	Número de flutuadores
L1	10:00	11:30	9
L2	13:30	14:15	8
L3	14:30	14:55	6

Os dados morfológicos foram adquiridos por um sistema de vídeo-monitorização (Santos *et al*., 2020) instalado num edifício da frente urbana a uma altitude de 20 m (NMM). As imagens coletadas são transmitidas via internet para uma *workstation* na Universidade de Aveiro onde se faz o processamento automático e geram-se os produtos finais (imagens *Timex*, de Variância e *Timestack*). A extração de informação quantitativa das imagens envolve a realização de dois procedimentos, a calibração das câmaras e a correção geométrica das imagens oblíquas. As imagens *Timex* contêm informação da variabilidade temporal e são obtidas pela média aritmética da intensidade de cada pixel, das diferentes imagens instantâneas ao longo de um período de tempo (no presente caso, 10 minutos). Imagens deste tipo permitem identificar a zona de rebentação das ondas (áreas a branco nas imagens *Timex*), que são um bom indicador da localização de barras submersas. No presente estudo, as imagens *Timex* obtidas nos dias 14 e 15 de outubro, com periodicidade horária, foram analisadas para delinear, em modo semi-automático, a linha de costa, entendida como a posição média do espraio das ondas no intervalo de 10 min de cada imagem *Timex*, e as barras submersas em modo manual.

3. RESULTADOS

3.1. Agitação marítima

A Figura 2 (a-d) representa os valores da profundidade (h), altura significativa (H_s), período médio (T_z) e rumo das ondas (Dir) medidos pelo ADCP1.

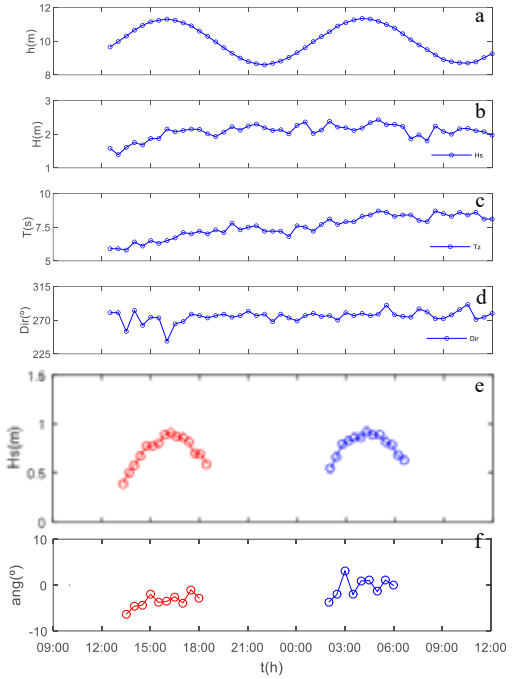


Fig. 2. Profundidade, h, (a), H_s (b), período médio, T_z, (c) direção das ondas, Dir, (convenção náutica) (d) medidos pelo ADCP1; H_s (e) e ângulo das ondas com a perpendicular à linha de costa, ang, (f) medidos na estação de amostragem P2 entre as 12h30 do dia 14 de julho e as 12h00 do dia 15 de julho 2019.

Os valores da altura significativa da onda medidos no ADCP1 variaram entre 1.4 e 2.4 m com um valor médio de 2.1 m. Durante o 1.º dia da campanha (entre as 12h30 do dia 14 de outubro e as 00h00 do dia 15 de outubro) verificou-se um aumento de H_s e no 2.º dia (entre as 00h00 e as 12h30 do dia 15 de outubro), os valores mantiveram-se aproximadamente constantes. O período médio da agitação marítima aumentou gradualmente de 5.8 s para 8.7 s durante o período de amostragem. A direção da agitação marítima foi sensivelmente uniforme, entre W e WNW. Os resultados obtidos através das medições do ADCP2 (não mostrados) permitem retirar conclusões idênticas.

Os valores de H_s e da direção da ondulação medidos no ponto P2 e ilustrados na Figura 2 (e,f) mostram que o sensor de pressão, enquanto imerso e para os dois ciclos de maré, se encontrou sempre na zona de rebentação, porque à medida que a profundidade

aumenta, a altura significativa da onda aumenta e os valores máximos registados de H_s são inferiores aos observados nos ADCP. Para os outros PT observaram-se resultados semelhantes. Os valores do ângulo de incidência da agitação marítima medidos relativamente à direção perpendicular à linha de costa (cuja orientação é cerca de 285°) variam entre -8º e cerca de 0º durante o 1º dia enquanto no 2.º dia os maiores valores do ângulo de incidência são positivos, isto é, provenientes de N.

3.2. *Correntes litorais*

A Figura 3 representa as séries temporais da velocidade média na coluna de água medida pelo ADCP1 e os valores das componentes longitudinal (v_x) e transversal (v_y) da velocidade no ponto P2.

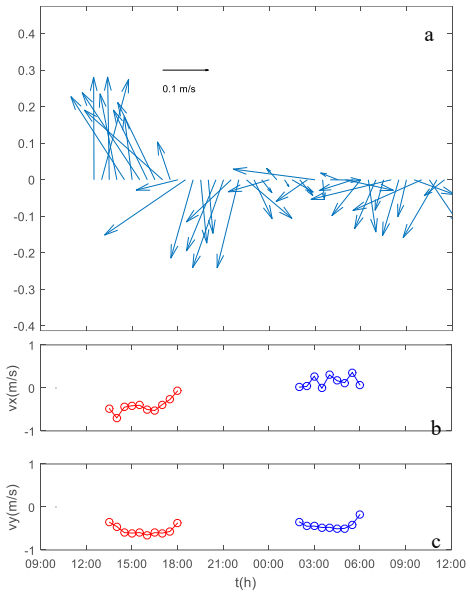


Fig. 3. Velocidade média na coluna de água medida pelo ADCP1 (a) e valores das componentes longitudinal (v_x) (b) e transversal (v_y) (c) da velocidade calculados no ponto P2 entre as 12h30 do dia 14 de julho e as 12h00 do dia 15 de julho 2019.

No local de fundeamento do ADCP1 a corrente esteve orientada para norte até cerca das 18h00 do dia 14, e até ao final desse dia orientada para sul. No 2.º dia de amostragem a componente para sul foi dominante, mas verificou-se uma intensificação da componente E-O da velocidade. Os perfis verticais das componentes da velocidade são uniformes na vertical, não apresentado inversões no sentido da corrente no mesmo instante. A intensidade do vento medida na torre meteorológica da Universidade de Aveiro a 30m de altitude (não mostrada) entre as 12h00 e as 20h00 do dia 14 de outubro apresenta uma intensidade superior a 5 m/s, com direção de NW. No dia 15 de outubro, a intensidade do vento foi constante (5m/s) com direção oposta (de SE). Verifica-se assim, para as pequenas profundidades onde se encontra o ADCP1, que a corrente média está associada à ação forçadora do vento.

Quanto aos valores das componentes v_x e v_y da velocidade medidos na zona entremarés em P2, os resultados mostram que durante o 1.º ciclo de maré a componente v_x da velocidade tem valores negativos (de S para N), que variam entre -0.8 e 0 m/s, enquanto durante o 2.º ciclo de maré os valores, ainda que menores, são sempre positivos (de N para S). Este resultado é coerente com os valores do ângulo de incidência da agitação marítima medidos, que sendo negativos (Fig. 2f) induzem uma corrente longitudinal para norte, enquanto no 2.º dia os maiores valores do ângulo de incidência são positivos, induzindo uma corrente para sul. Verifica-se também que os valores de v_y são sempre negativos indicando a presença de uma corrente de retorno (*undertow*) com valores máximos no pico da preia-mar, o que evidencia que o sensor esteve sempre na zona de rebentação.

3.3. *Vídeo-monitorização*

A Figura 4 mostra a imagem *Timex* obtida às 14h30 do dia 14 de outubro, com as localizações da linha de costa e zonas de rebentação (externa e interna).

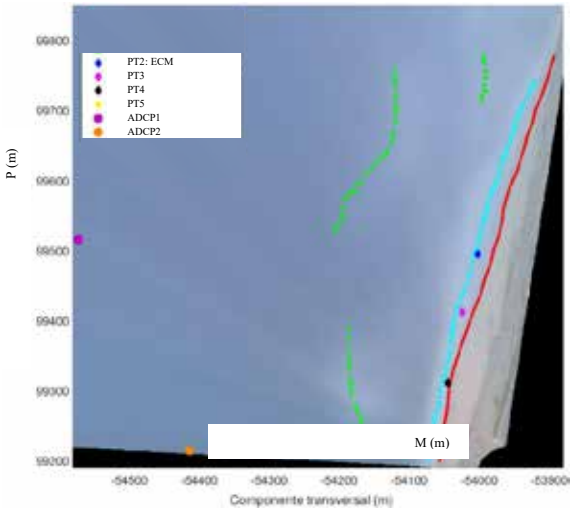


Fig. 4. Localização da linha de costa (a vermelho) e da rebentação (a verde e azul) às 14h30 do dia 14 de outubro. Os símbolos representam a posição dos equipamentos, conforme a legenda.

A análise da Figura 4 permite verificar que, no domínio de visão da câmara, a morfologia da praia submersa possui uma barra arenosa que se desenvolve na direção paralela à praia a uma distância de cerca de 100 a 200 m à linha de costa, sendo mais próxima no setor sul. É também visível na zona mais a norte da Fig.4 uma segunda barra, mais interna, no setor norte da praia. A zona de rebentação interna (a azul) é quase paralela à linha de costa.

3.4. *Trajetórias dos flutuadores*

A Figura 5 apresenta, a título de exemplo, a trajetória e o vetor velocidade para um dos flutuadores correspondentes ao primeiro lançamento (L1). São também indicadas as posições dos equipamentos de medição dos parâmetros hidrodinâmicos e a posição

estimada da linha de costa e da barra submersa determinadas a partir dos dados da câmara de vídeo-monitorização para a hora do lançamento.

No lançamento L1, efetuado às 10h00, todos os flutuadores foram libertados de uma posição localizada a sul do esporão da Vagueira e apresentam uma trajetória semelhante: inicialmente são transportados em direção à costa, depois infletem para norte, com valores positivos da componente da velocidade N-S que aumenta à medida que os flutuadores ultrapassam o esporão e que podem atingir até 1 m/s (os valores médios variam entre 0.33 e 0.82 m/s). Posteriormente, os flutuadores entram na zona de rebentação das ondas, localizada na barra submersa, deslocam-se para a costa e terminam a sua trajetória junto à linha de costa, na zona de espraio, onde geralmente apresentam uma componente da velocidade de norte para sul.

No lançamento L2 (13h30), os 8 flutuadores foram libertados a sul do esporão da Vagueira, como em L1, mas numa posição mais junto da costa. Neste caso, os flutuadores são transportados para a costa e descrevem uma trajetória semelhante a um arco de circunferência com a componente N-S da velocidade a aumentar à medida que se aproximam da costa. No lançamento L3, os flutuadores foram lançados num ponto com enfiamento do esporão, deslocaram-se para norte e infletiram para a costa após entrarem na zona de rebentação, tendo uma trajetória semelhante aos flutuadores L1.



Fig. 5. Trajetória e velocidade do flutuador 39 lançado no dia 14 de outubro às 10:00 (L1).

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Para as condições meteo-oceanográficas observadas durante a campanha, típicas do verão marítimo, os resultados obtidos evidenciam que a corrente antes da zona de rebentação, à superfície e a diferentes níveis na coluna de água, responde à ação do vento: a corrente esteve orientada para norte até cerca das 18h00 do dia 14 e, posteriormente, até ao final da amostragem a componente é predominantemente para sul, verificando-se também uma intensificação da componente E-O da velocidade. A trajetória dos flutuadores está de acordo com as observações efetuadas por ambos os ADCP. O padrão das correntes após a rebentação e até à zona de espraio é, pelo contrário, determinado pelas correntes médias induzidas pela ondulação. A análise das imagens *Timex*, adquiridas pelo sistema de vídeo-monitorização, permitiu estimar a localização da zona de rebentação das ondas e da barra submersa, verificando-se que se desenvolve ao longo da praia a cerca de 100-200 da linha de costa. A análise das trajetórias dos flutuadores, quando sobreposta a estes indicadores morfológicos, mostra que os flutuadores quando entraram na zona de rebentação se deslocaram na direção da propagação das ondas, decorrente do transporte de massa de água acima da cava das ondas em rebentação. A menores profundidades, na zona de espraio, os flutuadores foram transportados na direção da corrente longitudinal induzida pelas ondas, de acordo com as observações efetuadas pelos correntómetros instalados na zona entremarés.

A aquisição de dados de parâmetros hidrodinâmicos e morfológicos, recorrendo a vários instrumentos e plataformas de medição, mostrou-se como uma mais valia para a compreensão da circulação na zona costeira onde atuam múltiplos processos decorrentes de diferentes ações forçadoras. Os dados adquiridos constituem um elemento fundamental para aferir os modelos matemáticos aplicados para simular a morfodinâmica na zona adjacente ao quebra-mar destacado (Sancho *et al*., 2020).

Agradecimentos

A todos os elementos da equipa que participaram na campanha de campo. Ao município de Vagos pelas facilidades concedidas para instalação do sistema de vídeo-monitorização. Ao técnico do CESAM Luis Carvalheiro pelo apoio prestado ao sistema de comunicações do sistema de vídeo-monitorização. Os resultados decorrem de Programa coordenado pela Agência Portuguesa do Ambiente e cofinanciado pelo POSEUR - Programa Operacional Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos (referência POSEUR-02-1809-FC-000039).

REFERÊNCIAS

Sancho, F., Oliveira, F.S.B.F., Fortes, C.J., Baptista, P.R., Roebeling, P. (2020). Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira. *6as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 23 a 25 de junho.

Santos, F., Baptista, P.R., Sancho, F. (2020). (T3) Monitorização, aquisição de dados e trabalho de campo: Relatório final dos dados de vídeo-monitorização – Relatório 9. LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 343/2020 – DHA/NEC.

Coastline evolution of Corvo Island in the Azores archipelago: Preliminary results from the HAZARDOUS project

R. Quartau (1,3), P. Redweik (2,3), L. Lopes (2,3), S. Innocentini (1,3)

(1) Divisão de Geologia Marinha, Instituto Hidrográfico, Lisboa, Portugal. rui.quartau@hidrografico.pt

(2) Departamento de Engenharia Geográfica, Geofisica e Energia, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

(3) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

Abstract: The HAZARDOUS project aims studying the coastal erosion of three fajãs in the Azores archipelago (Fajã Grande in Flores Island, Fajã de Santo Cristo in São Jorge and Fajã da Vila in Corvo Island). This work will only focus on the evolution of a stretch of the western cliff of Corvo Island based on the analysis of photogrammetric flights from 1955 to 2008 covering a period of ~50 years. In order for the aerial photographs to be compared geometrically, it was necessary to carry the following steps: (1) Georeferencing, done by aerotriangulation and in some cases by Direct Linear Transformation; (2) Stereo reconstruction to obtain the lines in 3D necessary for this study, the cliff top and toe and the waterline. The results show that in the period 1955-1989, there was a general retreat of the cliff of 0.07 m/yr, but on the period of 1989-2008 there is an increase on the retreat rate to 0.09 m/yr.

Key words: Corvo Island, Azores, aerial photos, georeferencing, cliff evolution

1. INTRODUCTION

The HAZARDOUS project aims studying the coastal erosion of three fajãs (Portuguese name for supratidal talus at the foot of coastal cliffs) in the Azores archipelago (Fajã Grande in Flores Island, Fajã de Santo Cristo in São Jorge and Fajã da Vila in Corvo Island). On this work we will present results and a preliminary interpretation for a stretch of the western cliff of Corvo Island based on the analysis of photogrammetric flights from 1955 to 2008 covering a period of ~50 years.

2. GEOLOGICAL SETTING

Corvo Island is the smallest of the Azores Archipelago, only 6 km long and 4 km wide, with a total surface area of ~17 km^2. It is constituted by a 720 m-tall stratovolcano (~700 ka) with a summit caldera and a younger cone row on the south flank that fed a coastal lava delta at the south tip of the island (Fig. 1). Its tall steep cliffs, especially on the west side where they can reach 700 m, make this island very prone to coastal landslides, as testified by recent events (Melo et al., 2018). The western and northern island shelf is much wider than the eastern and southern counterparts, which is in agreement with the current wave regime (Fig. 2). The highest and more frequent waves come from NW and W (average Hs of 2.7 m and 2.8 m, respectively, summing 59% of the total waves). The waves hitting the eastern coast (NE, E and SE) are only 14% of the total and have average Hs of 2.0, 2.0 and 2.1 m respectively.

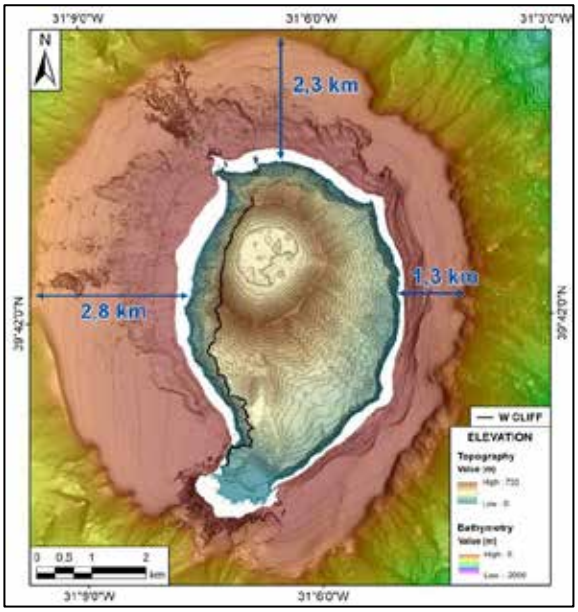


Fig. 1 - Image of Corvo Island and surrounding bathymetry DTM (10 m resolution). The white narrow area is not covered by bathymetric data. Source: Centro de Informação Geoespacial do Exército (CIGeoE) and Instituto Hidrográfico (IH). Topographic contours (dashed black lines) are spaced vertically every 25 m on land and every 10 m offshore. Blue arrows mark the shelf width. Black line marks the top of the cliff on the western coast (only a stretch of this coastline was analysed, see Figs.4 and 5).

3. DATA AND METHODS

In the scope of the HAZARDOUS project, we acquired aerial photos from 1955, 1959, 1989, 1991, 1995, 1999 and 2008 from Centro de Informação Geospacial do Exército (CIGeoE) and to Direção Geral do Território (DGT) to measure the coastline evolution between 1955 and 2008 in the different

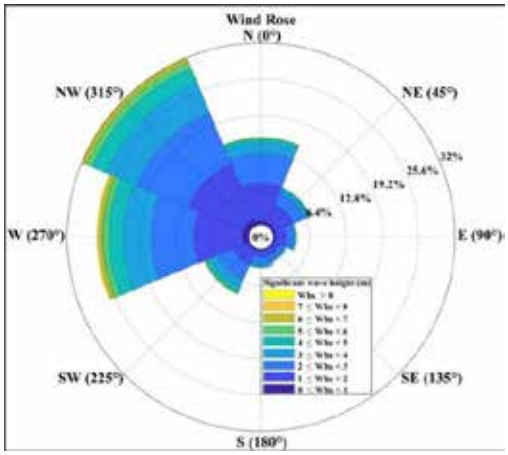


Fig.2 - Wave rose plot of offshore significant wave heights around Flores and Corvo islands derived from ERA 5 (Hersbach et al., 2019).

fajãs in a total of 110 photos. Some of the photos were kindly made available by the Azores Autonomous Region, in paper format and were scanned by DGT. In the summer of 2021, during field work for a UAV surveying of the fajãs, ground control points (GCP) were also acquired for georeferencing the old aerial photographs since these, unlike the newer ones, were not acquired with GNSS/IMU systems on board. A set of 12 GCP were collected in Corvo, 12 GCP in Flores and 15 GCP in S. Jorge.

An interactive aerotriangulation had to be calculated since automatic methods did not work well in the older photos and odd block configurations. Corvo Island was the first to be processed (Fig. 3). Table 1 presents the characteristics of the coverages and the results of the aerotriangulations.

Among other relief significant lines, the top of the cliff was stereo plotted on the photos of 1955, 1989 and 2008 and part of the western zone was analysed. We were unable to use the 1959 photos in this analysis due to shadows on that side of the island. For the analysis of the coastline evolution we used the Digital Shoreline Analysis System version 5.0 (DSAS) application that works within the Esri Geographic Information System (ArcGIS) software. The DSAS application is used to compute rates of change for any boundary-change problem that incorporates a clearly identified feature position at discrete times, such as a cliff line (Himmelstoss et al., 2018).

Table 1 –Aerial coverages and results of the aerotriangulation.

Date of flight	Scale	# Photos	# GCP	RMS XY/ Z [m]
1955	1:35000	6	13	0.066/ 0.009
1959	1:15000	6	11	0.081/ 0.036
1989	1:15000	26	13	0.628/ 0.394
2008	1:18000	12	5	0.331/ 0.180

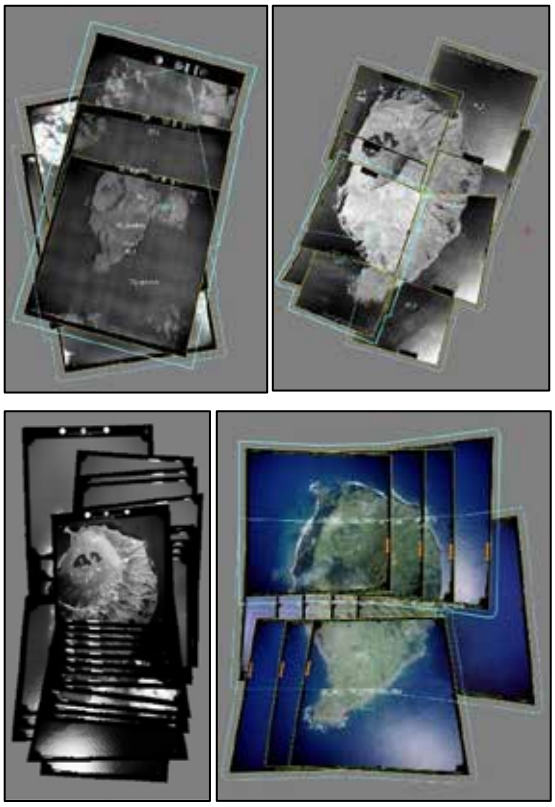


Fig.3 – Georreferenced blocks of Corvo island: 1955 (top left), 1959 (top right), 1989 (bottom left) and 2008 (bottom right)

4. RESULTS AND DISCUSSION

The comparison between the 1955-1989 photos (Figs. 4 and 6 and Tables 2 and 3) shows that there is a retreat of the western cliff (average of -4.21 m for the 34 years and a rate of -0.07 m/year).

For the period 1989-2008 (Figs. 5 and 7 and Tables 2 and 3) there is a general retreat of the western cliff (average of -1.53 m for the 19 years and a rate of -0.09 m/year), although in some places there is advance of the cliff line (average of 0.04 m). Some of this progradation could be associated to errors of georeferencing, but the values higher than 0.65m (the worse RMS in these blocks being 0.628m) could really reflect cliff progradation. Comparing the aerial photos, one can see that the problem is that from 1989 to 2008 there was an increase in the vegetation, which prevents seeing the edge on the 2008 cliff photos. Thus, by digitizing the edge of the vegetation it suggests that a progradation has occurred, when in fact it has not.

Furthermore, the changes in the evolution of the cliffs from one period (1955-1989) to the other (1989-2008), i.e., with an increase in the retreat rate from 0.07 to 0.09 m/yr needs to be further explored. It could represent an increase in wave energy or precipitation from one period to the other. However, looking at the wave height and period variation along the series, one cannot see any significant changes from 1989 to 2008 (Fig. 8).

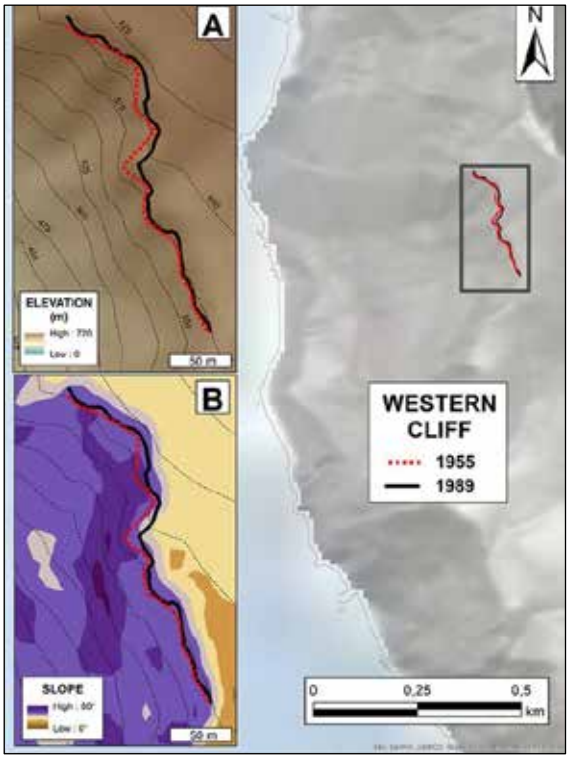


Fig. 4 – Stretch of cliff analysed in this study for the period 1955-1989. (A) Detail of the subaerial topography of the northern cliff showing retreat (solid red areas) and advance (solid blue areas). (B) The same as (A) but showing the slope of the topography. (C) The same as (A) but on the southern cliff. (D) The same as (B) but on the southern cliff.

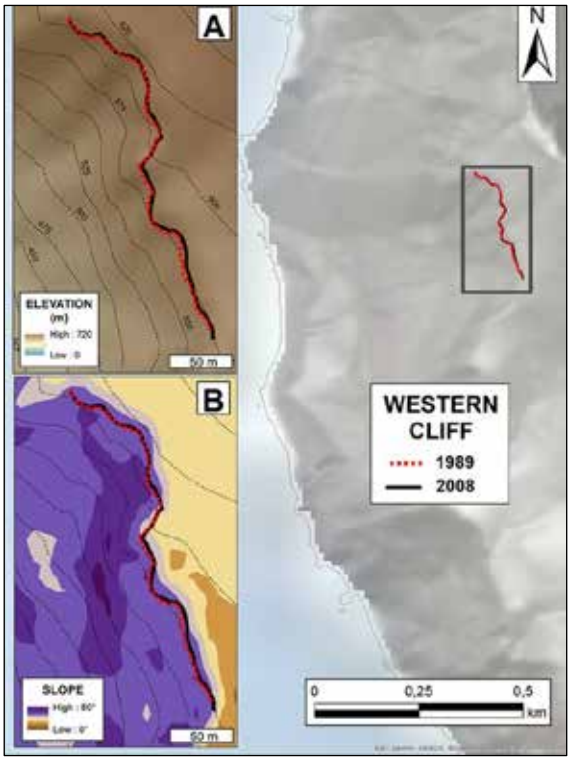


Fig. 5 – The same as figure 4 but for the period 1989-2008.

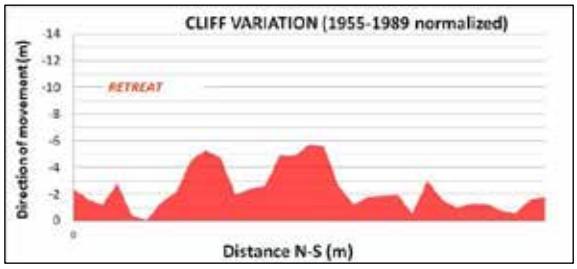


Fig. 6 – Cliff variation during the period 1955-1989 (normalized) along the western cliff from north to south.

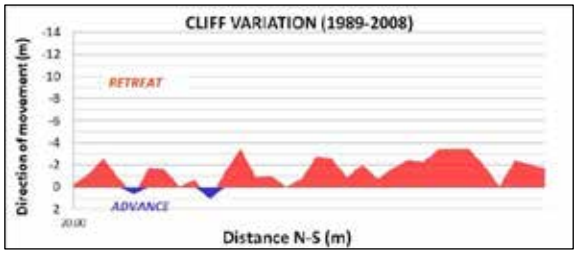


Fig. 7 – Cliff variation during the period 1989-2008 along the western cliff from north to south

Table 2 –Cliff changes (m)

PERIOD	1955-1989 (34 years)	1955-1989 (normalized to 19 years)	1989-2008 (19 years)
Average total	-4.21	-2.35	-1,53
Highest retreat	-10.19	-5.69	-3.46
Average retreat	-4.21	-2.35	-1.68
Highest advance	0	0	1.00
Average advance	0	0	0.82

Table 3–Rates of cliff changes (m/year)

RATES	1955-1989 (34 years)	1955-1989 (normalized to 19 years)	1989-2008 (19 years)
Average movement			-0.08
Average retreat rate	-0.12	-0.07	-0.09
Average advance rate			0.04

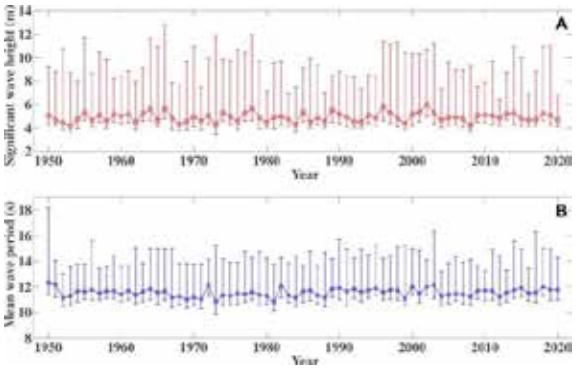


Fig. 8 – Extreme wave properties between 1950 and 2020 for the sea position adjacent to Flores and Corvo islands derived from ERA 5 outputs (Hersbach et al., 2019). (A) For times when significant wave heights were in the top 10th percentile, solid circles represent their wave heights at 95th percentile and black bars delimit the range of significant heights between 90th and 100th percentiles. (B) For the same period of data as in (A), blue-filled squares represent their 95th percentile mean periods and blue bars delimit the range of mean periods between 90th and 100th percentiles.

5. CONCLUSIONS

The analysis of the variation of a stretch of the western cliff of Corvo showed different trends along time. In the period 1955-1989, there is a general retreat of the coastline (0.07 m/yr), while during the period 1989-2008 that retreat increases to 0.09 m/yr. Surprisingly, some stretches of the coastline in this later period shows advances, but that has to do with the significant vegetation growth on the cliff edge that suggests erroneously an advance of the edge. However, the increase in the retreat rate from one period to the other must be further analysed to check if there is an increase of intensity of the triggering processes or there is some error of the georeferencing process.

Acknowledgements

Data acquisition and processing was funded by Fundação para a Ciência e a Tecnologia through the HAZARDOUS project (Evaluating HAZARDs related to the formation and development of detrital and lavic "fajãs" in the POrtugUese volcanic archipelagoS (PTDC/CTA-GEO/0798/2020). The work was also supported by FCT – project UIDB/50019/2020 – Instituto Dom Luiz. Laura Lopes and Simone Innocentini acknowledge respectively, their MSc and PhD (2020.07904.BD) fellowships funded by the HAZARDOUS project and FCT PhD research scholarships. We also acknowledge Marlene Antunes of the Direção de Serviços de Cartografia e Informação Geográfica do Governo Regional dos Açores, the CIGeoE and DGT for providing the aerial photos used in this study.

REFERENCES

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2019): ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on 20-12-2021), Doi:10.24381/cds.f17050d7

Himmelstoss, E.A., Farris, A.S., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., Ergul, Ayhan, Zhang, Ouya, Zichichi, J.L., and Thieler, E.R., 2018, Digital Shoreline Analysis System (version 5.0): U.S. Geological Survey software release, https://code.usgs.gov/cch/dsas.

Melo, C.S., Ramalho, R.S., Quartau, R., Hipólito, A.R., Gill, A., Borges, P.A., Cardigos, F., Avila, S.P., Madeira, J., Gaspar, J.L., 2018. Genesis and morphological evolution of coastal talus-platforms (fajãs) with lagoon systems: the case study of the newly-formed Fajã dos Milagres (Corvo Island, Azores). Geomorphology 310, 138-152.

Holocene mineralogical and grain-size sedimentary record in the south-western Portugal shelf

A. Oliveira (1,2), S. Cunha (1), J. Duarte (1,2), J. Pombo (1), N. Lapa (1), A. Vinhas (1), A. Rodrigues (1,2)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49. anabela.oliveira@hidrografico.pt

(2) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.

Abstract: In this study we pretend to understand the mineralogical and grain size variability along two sediment cores retrieved from shelf deposits along a transect close to the Boca do Rio outcrops (western Algarve). These cores were part of a set of sedimentary cores collected along the Algarve shelf, in the M152 expedition on-board of RV Meteor (November 2018). Cores GeoB23519-01 and GeoB23522-01, show a carbonated rich sediment related with the (1) prevailing continental limestone sources and (2) marine productivity (detrital and biogenic carbonates show negative correlation). The 8,2 ka cal event, where the paleo-oceanographic North Atlantic regime and marine productivity changes, is well detected in the sandier bottom of both cores due to an abrupt decrease of detrital carbonates (dolomites and Fe rich dolomites). The uppermost alternating pulses of finer (phyllosilicates) and coarser (feldspar and quartz) terrestrial material point-out to different climatic conditions observed during Holocene.

Key-words: Algarve shelf**,** grain-size, Holocene**,** mineralogy, sediments.

1. INTRODUCTION

Late Holocene is marked by rapid climatic changes due to North Hemisphere polar cooling, aridity and intensity variability of atmospheric circulation (Nieto-Moreno *et al*., 2011). The shelf sediments can preserve some of these changes, which conditioned the intensity of the prevailing transport processes (rivers, eolian, currents and waves), the climatic conditions in the source area, and the circulation in the Ocean and Atmosphere. Nevertheless, the interpretation of the sedimentary record is not straightforward, since other factors can disturb and obliterate the climatic signal, namely some high-energy events (tsunamis), sea level rise and inland sedimentary sources availability.

The study area comprehends the western Algarve middle-shelf deposits, were 2 vibro-cores were collected, along a transect in a mud patch, in front of Boca do Rio submarine outcrops (Fig.1). In the south coastal sector between S. Vicente Cape and Albufeira, cliffs are sculpted in Miocene bioclastic limestone and sandstone and Mesozoic limestone and marls. Beaches are generally confined to the river mouths, currently with low sedimentary loads. Due to its geodynamic setting, the Algarve coast was exposed to tsunamis, being the most relevant the historical 1755 BP one (Costa *et al*., 2021).

In this paper, our main goal is to use differences in the mineralogical signal as an indicator of major climatic and sea level changes and also detect the occurrence of high energy events (tsunamis), during the Holocene evolution of the SW Algarve shelf deposits.

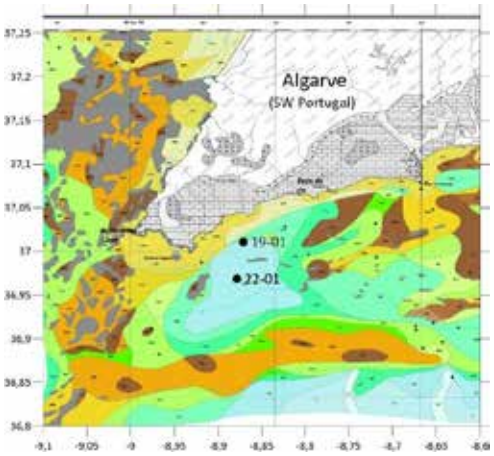


Fig.1.Vibro-cores location inserted in an excerpt of IH-SED7/8 sedimentological chart (blue-green colors correspond to muddy deposits and yellow-orange colors to sandy-gravel deposits).

2. METHODS

For this study, two vibro-cores, GeoB23519-01 and GeoB23522-01, collected at 65 m and 88 m water depth during the Lisbon 1755 - M152 expedition, on-board of RV Meteor (November 2018), were used. Both cores were sampled in 1 cm thick slices down to 180 cm depth and, afterward, in 4 cm intervals, to obtain a highest-resolution possible record for the last 11500 yr cal BP. Samples were analysed for grain-size and mineralogical composition. Fine fraction mineralogy (<63 µm) composition were obtained by X-Ray Diffraction using a PANalytical X´Pert Pro diffractometer with CuKα radiation and automatic slit (scans 4º-60º 2θ). Diffractograms were analysed using the HighScore® software to identify and calculate peaks areas in order to estimate semi-quantitative mineral content; the estimated error is

<5% of bulk mineral composition. The grain-size was done in two fractions using different technics: >500µm by standard sieve method and <500µm by laser diffraction method (Malvern 2000), which were combined to obtain the total cumulative mass percentage. Factorial analysis (FA) was performed in the mineralogical data set using the statistic software PAST (Hammer *et al*., 2001). Val-Peón *et al*. (2021) published the age model and sedimentation rate for vibro-core GeoB23519-01. The age model of Core GeoB23522-01 was not published.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The analysed sediments are predominantly composed by calcite (67-17%), quartz (47-2%), dolomite and Fe -dolomite (63-0%), calcite–Mg (41-0%), feldspars (31-0%), phyllosilicates, consisting of detrital mica and chlorite (16-0%), and minor amounts of aragonite (<10%). The mean grain-size ranges between 540-22 µm and 162-26 µm at sites GeoB23519-01 and GeoB23522-02, respectively. Sediments consist mainly in sands, sandy silt and silty sands. In GeoB23519-01, the content of sands is slightly higher (mean 60% *versus* 54 %), with increment of silt to GeoB23522- 1 (mean 36%); in both cores the mean content of clay is similar (8%). It is interesting to notice that the gravel content is generally low in both cores (mean<2%) but tiny layers of higher gravel content were observed, namely at 152 cm (21%) and 169 cm (17%) at site GeoB 23519-01 and 203 cm (10%) and 299-300 cm (10-12%) in site GeoB 23522-01. These gravel layers corresponds to biogenic clasts embedded in a silty matrix with an increase of feldspars and also phyllosilicates (Fig.2). In GeoB 23519-01 was previously identified at least two tsunami backwash deposits (AD 1755 Lisbon tsunami and 3.4 Ka cal BP tsunami; Feist *et al*., 2022) and it is interesting to notice that the base of this older event is marked by one of those gravel layers (152 cm).

The identification and characterization of sedimentary deposits were based on statistical analyses of the mineralogical data set. FA applied to normalized mineralogical data grouped in biogenic carbonates (calcite, calcite-Mg, aragonite) detrital carbonates (dolomite and Fe-dolomite), feldspars (plagioclase, K-feldspar), quartz and phyllosilicates (mica and chlorite), allowed to extract lower number of variables and identify similar behaviour, affinity and origin. For core GeoB 23519-01, the first two factors explain 71% of the variance; Factor 1 (F1), negatively correlates feldspar with detrital carbonates and Factor 2 (F2) also negatively correlates biogenic carbonates with detrital carbonates (Table I). Core GeoB 23522-01 is slightly different and the first two factors explain 69% of the variance; Factor 1, negatively correlates biogenic carbonates with detrital carbonates and Factor 2, also negatively correlates feldspar + qz + phyl (detrital minerals) with biogenic carbonates (Table I). It is remarkable the decoupling of detrital carbonates from the others detrital mineral namely feldspar in core GeoB23519-01 and also quartz and phyllosilicate's in core GeoB23522-01 (Table I); perhaps denoting different origins and also proximity to local sources (limestone and marls), *versus* far-off sources (granitic rocks).

Table I. Factor loadings, from two separated factor analysis, for GeoB23619-01 and GeoB23522-01 corers. Factor loadings <0.4 were withdraw.

Minerals	*GeoB23519-01*		*GeoB23522-01*	
	F1	F2	F1	F2
qz	-	-	-0.43	-1.15
feldsp	1,89	-0,59	-	-1.49
phyl	-	-0.40	-0.43	-0.50
carbD	-1,11	-0,98	1.46	-
carbB	-	1,88	-1.56	1.03
Eigenvalue	88.5	62.7	94.5	69.7
Variance (%)	41.4	29.3	39.5	29.2

Figures 2 and 3, show the vertical variation of the grain-size, mineralogical data and FA for core GeoB23519-01 and GeoB23522-01.

GeoB 23519-01: The core base between 350-215 cm, are coarser and very rich in carbonates namely detrital carbonates; but FA namely F2 factor, show at 285-215 cm an increase of biogenic carbonates with periodic cycles of higher biogenic productivity (autochthone material) versus inputs of detrital minerals (allochthone material). This transition possible indicate the 8.2 ka cal BP cold event and an increase in marine productivity (Val-Peón *et al*., 2021). Another important transition level are well marked at 215-185 cm by the increase of detrital minerals (including detrital carbonate) and decrease of biogenic carbonate; interpreted as an indication of a higher mean sea level period (around 6.3 ka cal BP) where higher amount of sediments can reach the coast and be deposited at the shelf area. Results obtained along the western Mediterranean coast (Goy *et al*. 2003), with an age of less than 7.4 ka cal BP, correlated several sea level oscillations with the high *Relative Mean Sea Level* periods and with increases in the amount of sediment reaching the coast. In most of the estuaries located in the study area (Alvor, Alcantarilha, Quarteira) the maximum flooding of the river valleys was registered at *ca.* 7–6 ka BP, resulting in the development of open estuaries, inundated channel banks, tidal flats, and even the landward migration of estuarine barriers (Boski *et al*., 2008, Trog *et al.,* 2013). After 185 cm until the top, when a definitive stabilization of sea level occur at 5.0 ka cal BP (Teixeira *et al*., 2005), the mineralogical signal show alternating pulses of terrestrial material, finer (phyllosilicates) or coarser (silicates) related with dried/arid and cooler periods and humid and warmer conditions observed during Holocene, respectively. Nevertheless, FA again show that the stronger signal

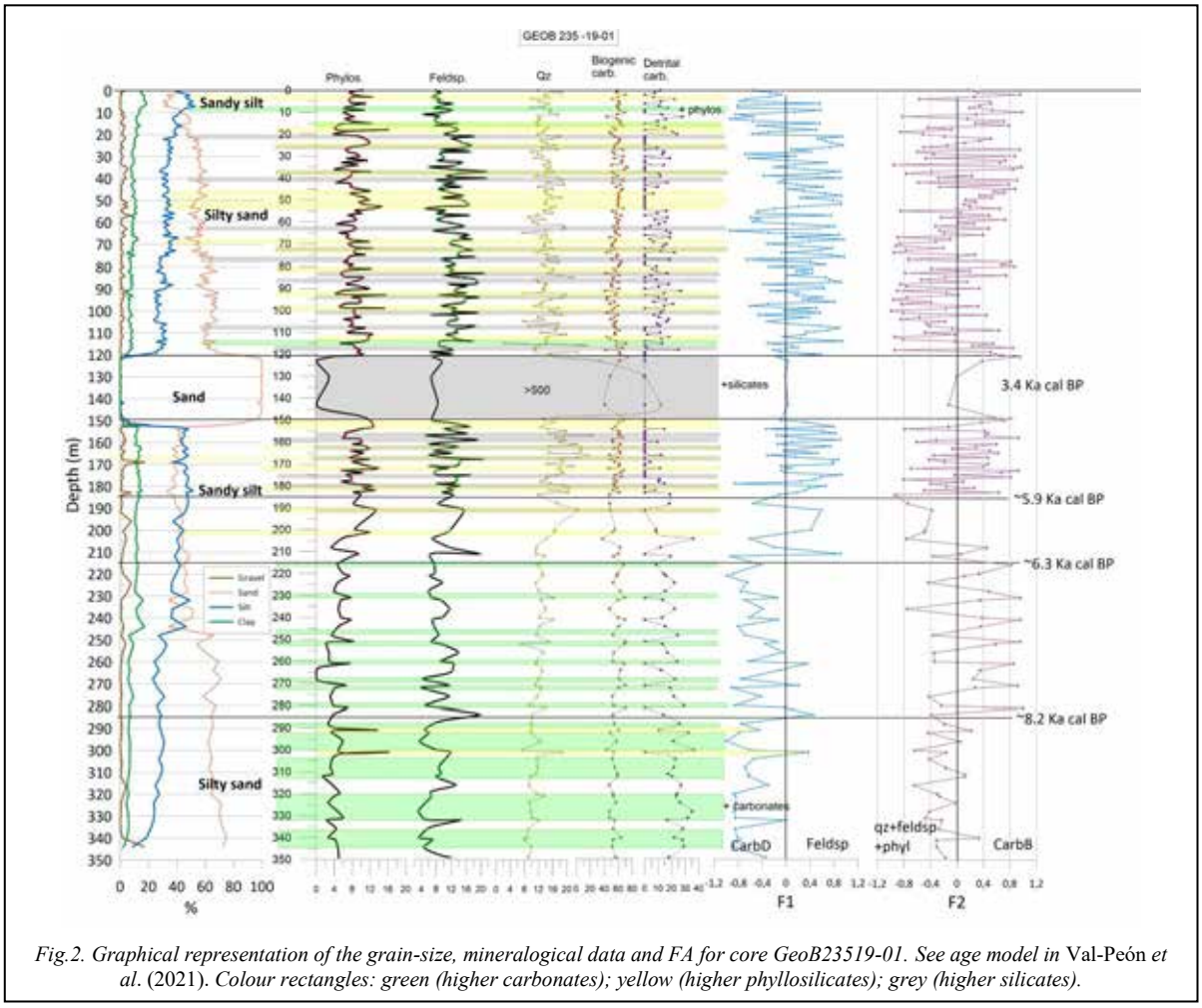


Fig.2. Graphical representation of the grain-size, mineralogical data and FA for core GeoB23519-01. See age model in Val-Peón *et al.* (2021). *Colour rectangles: green (higher carbonates); yellow (higher phyllosilicates); grey (higher silicates).*

are the negative relation between feldspars and detritus carbonate and the cyclic biogenic carbonated (related with increment of marine productivity) interbedded with feldspar, quartz and phyllosilicates layers (terrestrial signal). Disruptive high energy events, namely tsunamis are marked by silicate rich layers (quartz). A sandy layer with more than 30 cm (between 120-150 cm) where correlated with the 3.4-ka cal BP event (Feist *et al.,* 2022).

GeoB 23522-01: Taking into account of the mineralogical variability of core 19, the base between 420-300 cm is coarser (sand) but also well marked by a detrital carbonated mineralogical (dolomites) signal. In this core the increment of biogenic carbonates (increment of marine productivity) here associated with quartz + phyllosilicates seems to occur at 300-225 cm (Fig.3). The layers possibly related with higher sea level period, where greater amounts of terrigenous sediments can reach the shelf, seems also well marked between 225-155 cm. After 155 cm until the top the negative relation between biogenic carbonates+ quartz + phyllosilicates and detritus carbonate show also a cyclical pattern as found in core GeoB 23519-01.

High energy events marked by quartz+feldspars peaks where also found. It is interesting to notice the increment in the115-125 cm layer that can be the fine fraction signature, at higher depths, of the 3.4 ka cal BP event.

4. FINAL CONSIDERATIONS

The two vertical samples, collected in the Algarve shelf were described, in what concerns textural and mineralogical vertical variation, and integrated with the available age model. The major findings can be summarized as follows:

Mineralogy of fine fraction show a carbonated rich sediment testifying the continental source material dominated by limestones/marls. The marine productivity variation along cores were correlated to the Late Holocene mean sea level evolution. The 8.2 ka cal BP cold event was highlighted by a rise in marine productivity and an increase of biogenic carbonates in the fine sediments. The 7–6 ka BP high relative mean sea level was observed in both corers by an increase of terrigenous sediments. The retrieved cores show evidences of contrasting high energy events, namely the 3.4 ka cal BP tsunami event, which is marked by a silicate rich layer.

Acknowledgements

This paper is a contribution for the On-Off project (PTDC/CTA-GEO/28941/2017).

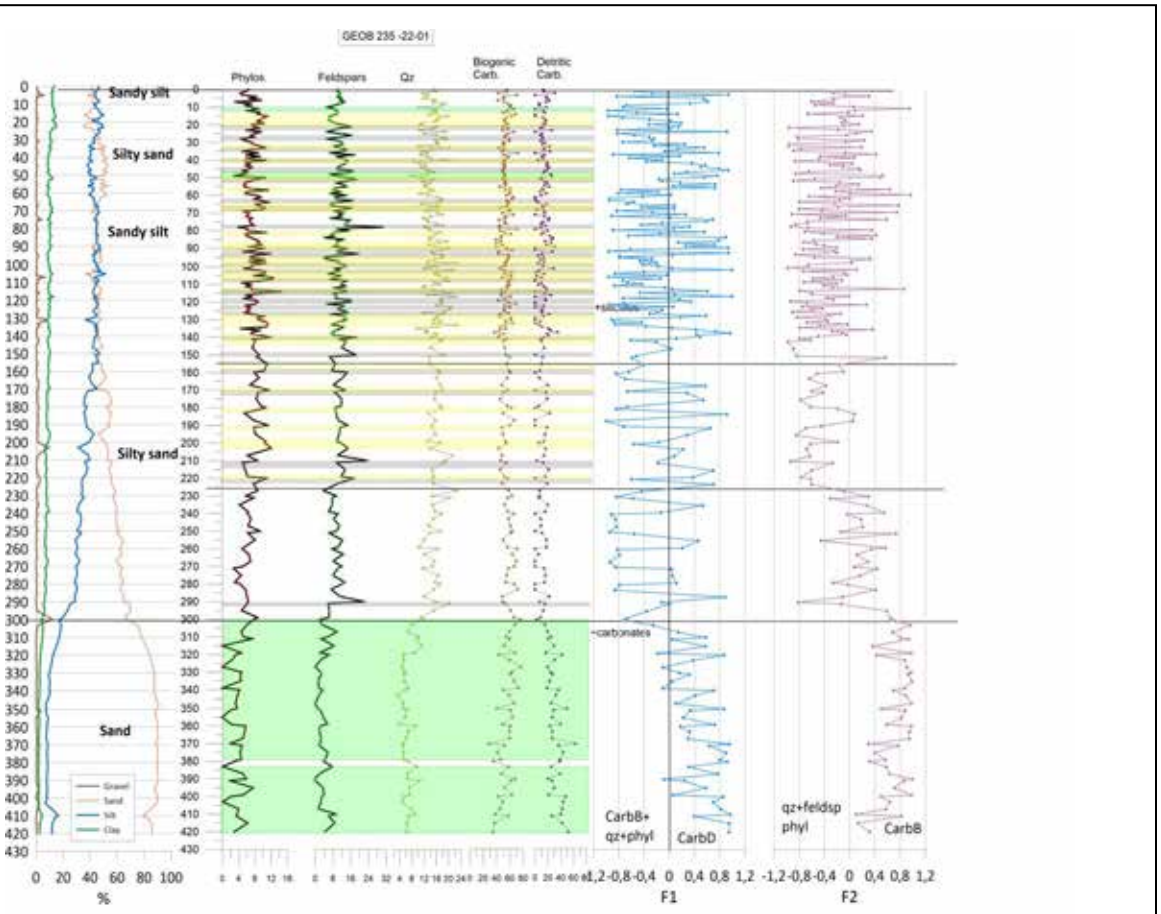


Fig.3. Graphical representation of the grain-size, mineralogical data and FA for core GeoB23522-01. Colour rectangles: green (higher carbonates); yellow (higher phyllosilicates); grey (higher silicates).

REFERENCES

Boski, T., Camacho, S., Moura, D., Fletcher, W., Wilamowski, A., Veiga-Pires, C., Correia, V., Loureiro, C., Santana, P. (2008). Chronology of the Sedimentary Processes during the Postglacial Sea Level Rise in Two Estuaries of the Algarve Coast, Southern Portugal. *Estuarine. Coastal Shelf Science,* 77, 230–244.

Costa, P., Dawson, S. Ramalho, R., Engel, M., Dourado, F., Bosnic, I., Andrade. C. (2021). A review on onshore tsunami deposits along the Atlantic coasts. *Earth-Science Reviews,* 212.

Feist, L. Costa, P.J., Santisteban, J.I., Albers, S., De Batist, M., Duarte, J., Reicherter, K., (2022). Hydroacoustic expression of offshore tsunami deposits on the Algarve shelf, Portugal. EGU General Assembly, Vienna, Austria, 23-27 May 2022, EGU22-9189.

Goy, J. Zazo, C., Dabrio, C. (2003). A beach-ridge progradation complex reflecting periodic sea-level and climate variability during the Holocene (Gulf of Almería, Western Mediterranean). *Geomorphology*, v.50, 1-3:251-268.

Hammer, Ø, Harper, D.A.T., Ryan, P.D. (2001). PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Electronica,* 4(1):9pp.

Nieto-Moreno, V., Martinez-Ruiz, F., Giralt, S., Jiménez-Espejo, F., Gallego-Torres, D., Rodrogo-Gámiz, M., García-Orellana, J., Orteha-Huertas, M., de Lange, G.J. (2011). Tracking climate variability in the western mediterranean during the Late Holocene: a multiproxy approach. *Climate of the past*, 7:1395-1414.

Teixeira, S. B. Gaspar, P. Rosa, M. (2005). Holocene Sea-level índex points on the Quarteira Coast (Algarve Portugal). *Proceedings Coastal Hope 2005*; pp.125-127.

Trog, C.; Höfer, D.; Frenzel, P.; Camacho, S.; Schneider, H.; Mäusbacher, R. (2013). A Multi-Proxy Reconstruction and Comparison of Holocene Palaeoenvironmental Changes in the Alvor and Alcantarilha Estuaries (Southern Portugal). *Revue Micropaléontologie*, 56, 131–58

Val-Peón, C., Santisteban, J. I, López-Sáez, J.A. Weniger G. - C,. Reicherter, K. (2021). Environmental changes and cultural transitions in SW Iberia during the early-Mid Holocene. *Applied Sciences*, 11, 3580.

Evaluation of sedimentological and geochemical datasets – ria Formosa's case study

S. Moreira (1,2), R. Santos (1), A. Oliveira (1,2), J. F. Duarte (1,2)

(1) Instituto Hidrográfico - Divisão de Geologia Marinha. Lisboa, Portugal. sandra.moreira@hidrografico.pt

(2) Instituto Dom Luiz. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Abstract: Ria Formosa is a complex depositional system that accumulates poorly to very poorly sorted sediments with a polymodal grain size distribution, whose mean diameter varies in a broad range (coarse silts to coarse sands). Quartz and feldspars are the main minerals of the fine-grained fraction of the sediments. The increase of the finer fraction from the main inlet towards inland is accompanied by spatial variation of the analyzed elements' content (except for Ca). The mean grain-size show a high positive correlation with Si, but inverse with the remaining elements. Our textural and compositional results seem to be in agreement with previous studies. However, some discrepancies in elemental concentrations were found, namely for Al, K, and Ti. In this work, we pretend to explain to which extent the chosen analytical methodologies can affect the obtained results, standing out the importance of authors providing detailed information of all analytical steps.

Keywords: major and minor elements, sediment texture, silicate minerals, XRF spectrometry.

1. INTRODUCTION

Ria Formosa, on the southern coast of Portugal, is a shallow and mesotidal coastal lagoon enclosed by a barrier island system, with connection to the ocean by 6 artificial and natural inlets. It displays a triangular shape, extending along 55 and 6 km in the W-E and N-S direction, respectively (Newton e Mudge, 2003).

The back-barrier system is constituted by extensive salt marshes, sand, and muddy flats intersected by a complex tidal channel network. The input of freshwater to this system may be considered negligible, except in the eastern sector and during periods of heavy rainfall (Moura *et al*., 2019). Therefore, tides are the main forcing agent of the lagoonal water circulation and renewal. So, is assumed that the sediments deposited in Ria Formosa originate from the erosion of sandy cliffs and subsequent longshore transport (Sousa *et al*., 2019) or are transferred from the inner shelf to the lagoon by the ebb tide or due to overwash events.

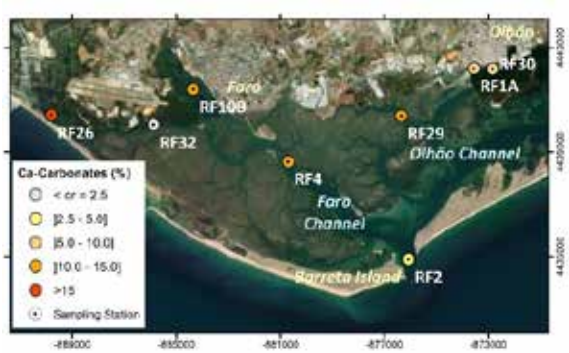


Fig. 1. Location of the 8 sampling stations in the study area and spatial distribution of the calcium carbonate content.

The goal of this study is to examine the spatial distribution of textural and compositional characteristics of surface sediments from the western sector of Ria Formosa and compare it with datasets available in the scientific literature.

2. METHODS

In February 2019, eight sediment samples were collected by Instituto Hidrográfico (AQUIMAR project), in Ria Formosa, between Faro Island and Olhão (Fig. 1), with a Petite Ponar sampler. The samples were properly stored and refrigerated during the transportation to the IH facilities.

At Marine Geology Division laboratories, after homogenization and quartering, three aliquots were taken from each sample to 1) grain-size, 2) elemental, 3) and mineralogical analysis.

Subsamples for grain size analysis were pre-treated with hydrogen peroxide to remove organic matter, and then wet sieved at 500 µm. Each fraction was dried before being analyzed by mechanical dry sieving ($\varnothing > 500$ µm) and laser diffraction ($\varnothing < 500$ µm) using a Malvern Mastersizer 2000. The grain-size parameters (mean, mode, and sorting) were calculated by the Folk e Ward (1957) graphical method using the GRADISTATv9.1.

Prior to the elemental analysis, sediment samples were grinded using a Retsch Ball Planetary Mill, model PM 100. Total inorganic and organic carbon (TIC and TOC) were obtained by Non-Dispersive Infra-Red detection (NDIR) using a SKALAR Primacs$^{SNC-100}$ analyzer. Calcium carbonate ($CaCO_3$) contents were estimated by multiplying TIC by 8.333 (i.e. the mass ratio of $CaCO_3$ to C). The

concentrations of seven elements (Al, Si, K, Ca, Ti, Mn and Fe) were determined by Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence spectrometry (EDXRF) with an Oxford X-MET7500 handheld analyzer, hold in a benchtop stand and remotely operated.

Semiquantitative analyses of the fine fraction mineralogy (<63 µm) were carried out on a PANalytical X'Pert Pro X-ray diffractometer. This analysis was not performed in the sample RF2 (see Fig. 1) due to the absence of a fine fraction. Each sample was loaded into a stainless steel sample holder and subjected to direct Cu K_α radiation (λ=1.54163 Å). The diffraction intensities of crystal planes in the range of 4 - 60° 2θ were measured. Subsequent data were processed with analytical software platform X´Pert Highscore to identify the existent minerals based on diffraction peak patterns from a database and calculate peaks areas.

3. TEXTURAL AND COMPOSITIONAL CHARACTERIZATION

In this study, Ria Formosa sediments vary from sandy muds to sands (Fig. 2A) with a low organic content (TOC < 3%, Tab. i). Most of them can be classified as gravelly sediments due to a gravel content higher than 5%, which is somewhat related with the $CaCO_3$ content (2.5 – 16.7%) (Tab. i). The mean grain-size vary in a broad range, from coarse silt (20.85 µm) to coarse sand (0.77 mm) (Tab. i), reflecting the dominant grain-size class of the sediment (Fig. 2A).

These sediments are a complex mixture of two or more grain-size populations (Fig. 2B) and consequently classified as poorly to very poorly sorted (Tab. i). The only exception is the moderately well sorted sediment collected at the RF2 sampling station, in the middle of Faro-Olhão inlet, with a unimodal and coarse skewed distribution (Fig. 2B).

Landwards from the main inlet, occurs the incorporation of mud into the sediments, while the $CaCO_3$ content decreases, in the following sequence: RF2 → RF4 → RF10B → RF32 towards the west and RF2 → RF29 → RF1A →RF30 towards east (Fig. 1 and 2B). However, in RF2 sampling station, the $CaCO_3$ content is lower than in the surrounding ones, which is probably due to the high currents velocities attained in the main inlet (2.22 m s^{-1} and 1.59 m s^{-1} during ebb and flood conditions, respectively (Pacheco *et al*., 2006)).

As expressed in table i, fine-grained particles can constitute up to 76.2% of the sediment, with silts overcoming 1.8 to 2.5 times the clay content. Quartz is the dominant constituent of this sediment fraction. Only in sample RF26, the one with higher $CaCO_3$ content in the total sample, calcite surpasses 1.5 times the amount of quartz. More than ¾ of the fine-grained fraction is constituted by tectosilicates (quartz, k-feldspar, and plagioclase). The iron oxides, solely represented by hematite, are absent or vestigial, and the remaining portion corresponds mainly to carbonate minerals. Calcite is the main carbonate mineral detected in the analyzed sediments, while dolomite (RF10B and RF26) and siderite (RF4 and RF29) are found in some scattered samples.

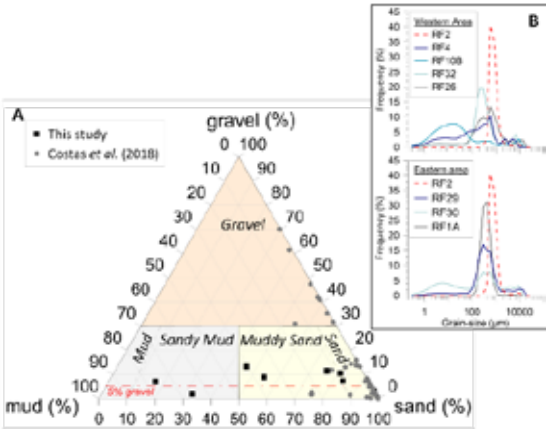


Fig. 2. A- Textural sediment classification. B – Grain-size distribution curves of the analyzed sediments. Textural classification adapted from Folk (1954).

Tab. i – Variation range of the textural parameters and elemental concentrations.

Element	Min - Max
Gravel (%)	2.02 – 13.20
Sand (%)	16.77 – 96.78
Silt (%)	0 – 55.19
Clay (%)	0 – 22.39
Silt/Clay	0 (1.8) – 2.6
Mud (%)	0 – 76.24
Mean grain-size (µm)	20.85 – 767
Sorting degree (µm)	1.42 – 14.84
TOC (%)	<3%
$CaCO_3$ (%)	2.5 – 16.7
Al (%)	1.42 – 8.54
Si (%)	23.80 – 40.99
K (%)	0.73 – 1.93
Ca (%)	1.60 – 8.05
Ti (%)	0.01 – 0.41
Mn (mg kg^{-1})	≤198
Fe (%)	0.08 – 3.6

The concentrations of major and minor elements in total sample are highly variable (Tab. i and Fig. 3), reflecting the diversity of sediment textures or the presence of bioclastic particles. Elements such as Al, K, Ti, Mn and Fe are associated with the fine-grained fraction, exhibiting a high positive correlation with the mud content (r≥ 0.91), as well with silt and clay, and among them (r = 0.92 – 0.98). On the other hand, Si, which is positively correlated with the mean grain-size of sediment (r = 0.88) and the sand content (r = 0.96), display an inverse behavior comparatively with the former elements (r = -0.96 – -0.92). Therefore, the sandy muds exhibit lower Si/Al ratios (2.8 – 3.7) and Si contents (23.8% – 27.1%) than the muddy sands and sands, but higher Al (7.3% – 8.5%), K (1.9% – 1.9%), Ti (0.37% – 0.41%), Mn (135 mg kg^{-1} – 196 mg kg^{-1}) and Fe (2.9% – 3.3%) contents.

In these sediments, the Ca contents are highly correlated with the presence of $CaCO_3$ minerals

(r = 0.99). Both are somewhat correlated with the gravel content (r ≈ 0.7), displaying a good linear fit if excluding the sediment sample retrieved in the vicinity of the Olhão yachting harbor (RF1A) (Fig. 4). It is estimated that up to 6.7 % of Ca is from biogenic origin.

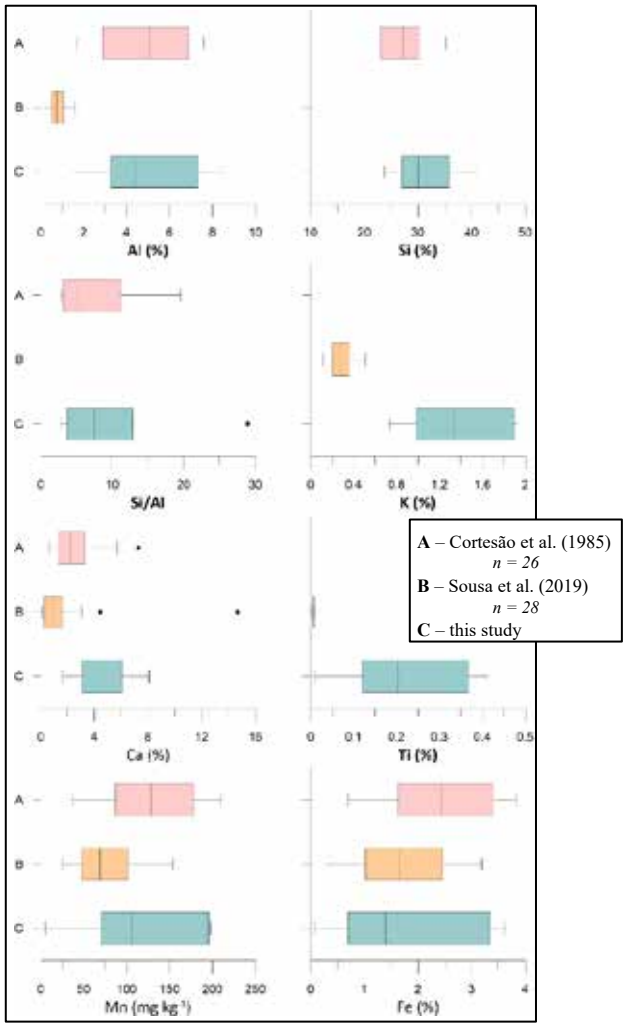


Fig. 3. Elemental content variation of Ria Formosa's sediments (● - outlier).

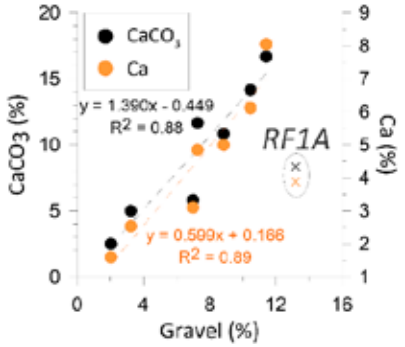


Fig. 4. Variation of calcium carbonate ($CaCO_3$) and calcium (Ca) content in function of the gravel content.

4. COMPARISION WITH OTHER DATASETS

Surface samples collected in the 2000's in the tidal inlet, Faro Channel and in the lee side of the Barreta Island (Costas *et al*., 2018) correspond to coarse-grained sediments, mainly composed of sand-sized particles (Fig. 2A). Those whose mean grain-size is higher than 0.5 mm (coarse sands to granules) were found in the main inlet and in the downstream stretch of Faro Channel, as well in the inner beach and sandbanks of the barrier island (Fig. 5). This is in accordance with our observations of fining of the sediment towards the inland.

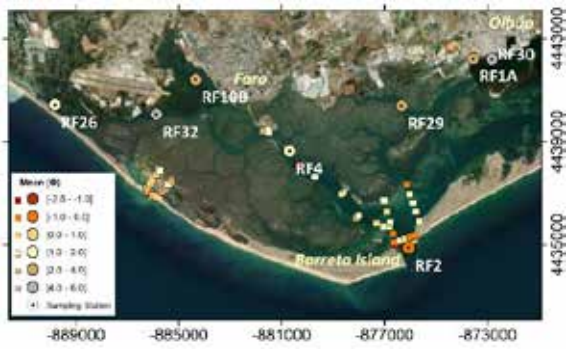


Fig. 5. Spatial distribution of the mean grain-size of Ria Formosa's surface sediments. This work (round dots) and Costa et al. (2018) (square dots).

Elemental concentrations of the sediments were compared with two datasets that can be consulted in Cortesão *et al*. (1986) and Sousa *et al*. (2019) (Fig. 3). The former refers to samples collected in 1980, while for the last one sampling date is not clear. Despite almost four decades between sampling surveys, one can identify a certain similarity between the elemental concentrations (Al, Si, Mn and Fe) and Si/Al ranges of the sediments collected in 1980 (Cortesão *et al*., 1986) and in 2019 (this study). However, the concentration range of Al, K, and Ti for the sediments analyzed in Sousa *et al*. (2019) are notably lower than those reported here. The observed discrepancies can be explained by differences in the analytical methodology, mainly associated with the sample preparation step.

In the present study, as previously indicated, samples were analyzed by EDXRF spectrometry and the measurements were done directly on the sediment with minimum preparation. The sediment was ground into a fine powder to avoid random scattering of fluorescent light or reflected light due to variable particulate sizes. On the other hand, in the other studies, geochemical analyses were carried out with two analytical techniques that require digesting the sediment to bring the elements into an aqueous solution for elemental measurement. In the older study, flame atomic absorption spectrometry (FAAS) was used after the digestion of the sediment with aqua regia (HNO_3-HCl; 1:3) and HF. On the other hand, in the most recent one, inductively coupled plasma emission spectroscopy (ICP-ES) was used after the sediments underwent a modified aqua regia extraction protocol (HNO3-HCl-H2O; 1:1:1). So, while the EDXRF spectrometry provides the total concentration of elements, the other analysis techniques involve acid digestions that release a

different amount of elements from the sediment matrix that can affect the measurement results.

The use of aqua regia is considered by some authors an extraction procedure rather than digestion because it only ensures partial digestion for most rock-forming elements and elements of refractory nature (Rayment and Lyons, 2010), despite being effective on most base metal sulfates, sulfides, oxides and carbonates. Several studies had shown that this method fails to accurately quantify several elements in sediments (Krause *et al.*, 1995), especially Al and K. For example, Alloway (1995) showed that the digestion of a soil with aqua regia only retrieved 30 – 40% and 10 – 20% of the total concentration of Al and K, respectively. However, adding HF turns the digestion more vigorous, dissolving the elements linked to the structures of silicate minerals.

5. FINAL REMARKS

Despite the small dataset, the variability of the analyzed parameters attests to the complexity of the depositional environments of Ria Formosa, which is in agreement with larger sedimentological and geochemical datasets available in the scientific literature. The discrepancies between the geochemical data of this study and the dataset from Sousa *et al*. (2019) arise from the application of different analytical methodologies and can be easily explained.

The authors do not pretend to declare that one analytical methodology should be preferred over others. The focus is to emphasize how careful should be the comparison between geochemical datasets once there is no international consensus about a unique analytical technique or digestion method that allows the homogeneous interpretation of results obtained in different studies. So, it is pivotal that authors provide detailed information about the entire analytical method, especially if it includes a digestion/extraction step of the sediment, to allow discerning if the expressed results correspond to total or pseudo-total (i.e. partial) concentrations. For example, Sousa *et al*. (2019) besides indicating the analytical method and the type of digestion carried out, also clearly state that the study is based on pseudo-total concentrations.

Conservative elements, such as Al and Ti, are usually used as geochemical normalizers to correct for grain-size effects and dilution by sedimentary phases devoid of these elements (e.g. carbonates, silica, organic matter, Fe-Mn oxides), and to assess the enrichment of a trace element in the sediment. If by chance, one calculates enrichment factors based on results that do not represent the same type of data (i.e. total vs pseudo-total concentrations), this can result in misleading interpretations that can ultimately lead to taking action based on erroneous assumptions.

Acknowledgments

This research was supported by project AQUIMAR – Caraterização geral das áreas aquícolas para estabelecimento de culturas marinhas (MAR2020 No. MAR-02.01.01- FEAMP-017).

REFERENCES

Alloway, B.J. (1995). *Heavy Metals in Soils*. Chapman & Hall, London.

Costas, S., Ramires, M., Sousa, L. B., Mendes, I., and Ferreiras, O. (2018). Surficial sediment texture database for the south-western Iberian Atlantic margin. *Earth System Science* Data, 10, 1185-1195.

Cortesão, C., Mendes, R., and Vale, C. (1986). Metais pesados em bivalves e sedimentos na Ria Formosa, Algarve. *Boletim do Instituto Nacional de Investigação de Pescas*, 14, 3-28.

Folk, R.L. (1954). The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature. *The Journal of Geology*, 62, 344–359.

Folk, R.L., and Ward, W.C. (1957). Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.

Krause, P., Erbslöh, B., Niedergesaess, R., Pepelnik, R., and Prange, A. (1995). Comparative study of different digestion procedures using supplementary analytical methods for multi element-screening of more than 50 elements in sediments of the river Elbe. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 353, 3-11.

Moura, D., Aníbal, J., Mendes, I., and Gomes, A. (2019). Introduction. In: J. Aníbal, A. Gomes, I. Mendes and D. Moura (eds.). *Alluvial fans, a field approach*. Centre for Marine and Environmental Research (CIMA) – University of Algarve, Faro, 13-16.

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., Carrasco, A.R., Vila-Concejo, A., Ferreira, Ó., and Dias, J.A. (2006). Recent evolution of Faro Channel and its associationto dredging operations (Algarve, Portugal). *Journal of Coastal Research*, SI 39, 572-577.

Rayment, G.E., and Lyons, D.J. (2010). *Soil Chemical Methods*. CSIRO Publishing, 520 pp.

Sousa, C., Boski, T., and Pereira, L. (2019). Holocene evolution of a barrier Island system, Ria Formosa, South Portugal. *The Holocene*, 29, 64-76.

Geomorfologia da plataforma continental do Algarve no sector compreendido entre o cabo de São Vicente e Albufeira

A. Vinhas (1), A. Rodrigues (1)

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

Resumo: A plataforma continental do Algarve entre o cabo de S. Vicente e Albufeira é muito rica do ponto de vista morfológico, apresentando como formas de relevo dominantes extensos afloramentos rochosos, principalmente no seu setor ocidental, e a cabeceira do canhão de Portimão na plataforma externa. A interpretação de dados geofísicos existentes na área permitiu associar alguns traços fisiográficos com as caraterísticas geodinâmicas deste setor da margem portuguesa. Nesta comunicação são descritas algumas das particularidades encontradas.

Palavras-chave: Algarve, geomorfologia, plataforma continental

1. INTRODUÇÃO

A margem continental algarvia (MCA) localiza-se na fachada sul de Portugal continental e constitui, conjuntamente com a margem SW espanhola, o bordo setentrional do Golfo de Cádis. A plataforma continental ocupa cerca de 2500 km^2 até à batimétrica dos 200 m e a vertente superior cerca de 6000 km^2 entre os 200 e 1000 m.

Na presente comunicação são descritas algumas particularidades relativas aos traços fisiográficos deste sector da margem portuguesa procurando-se estabelecer a sua origem. Para tal, serão analisados perfis de reflexão sísmica, que permitem descrever a estrutura da camada sedimentar recente.

2. ENQUADRAMENTO

A morfologia da área de estudo é o reflexo de uma evolução geológica controlada pela tectónica e pela dinâmica sedimentar, em contexto similar ao das restantes regiões do Golfo de Cádiz (Maldonado e Nelson, 1999).

2.1. Geologia e tectónica

A cartografia geológica deste sector da margem portuguesa (Fig.1), mostra que a estrutura geológica da área imersa é composta por três unidades geológicas inseridas na Bacia Mesocenozóica do Algarve (BA): a unidade **p-a** corresponde a formações de enchimento de paleovales ou de progradação sigmoidal, do Pliocénico e Quaternário; a unidade **m-a** corresponde a acumulações complexas presentes a sul do Tejo, cujas espessuras podem atingir os 500 m, com idades entre o Miocénico e Quaternário. Estão presentes algumas manchas correspondentes à unidade **J-C**, do Mesozóico indiferenciado.

No contexto tectónico, este sector da margem continental portuguesa encontra-se perto do limite de placas litosféricas Eurásia-Núbia. Trata-se de uma fronteira de regime transtensivo direito, na região da Terceira, passando a desligamento puro dextrogiro na falha transformante da Glória, sendo algo impreciso mais a oriente na fronteira Açores-Gibraltar, onde esta convergência interplacas é acomodada sobretudo em falhas que definem uma fronteira de placas discreta, embora geométrica e cinematicamente complexa. O registo de inúmeros epicentros de sismos através de instrumentalização (IPMA,2004 e 2014), demonstra que a BA é tectonicamente ativa.

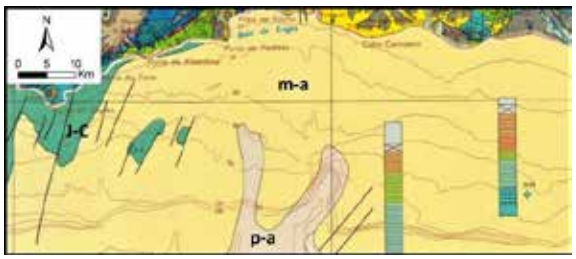


Fig. 1. Excerto da Carta Geológica de Portugal, na escala 1: 500 000, folha sul, onde está representada a cartografia das formações geológicas da área imersa que constituem o substrato rochoso da plataforma continental.

2.2. Caracterização geomorfológica geral da plataforma

A plataforma continental pode ser dividida em três domínios distintos: interno, intermédio e externo. A distribuição e tipologia dos depósitos sedimentares, representados na cartografia sedimentar (IH, 2009) estão, naturalmente, relacionados com os processos dinâmicos que caraterizam cada um destes domínios.

A **plataforma interna** estende-se desde a linha de costa até aos -40/ -50 m de profundidade, e caracteriza-se pela presença de ligeiras quebras de pendor na superfície morfológica. Os depósitos superficiais que caracterizam esta zona são, maioritariamente, areias médias, podendo localmente ser encontradas areias cascalhentas e areias grosseiras. A **plataforma média**, entre os -50 e os -80/-90m, é constituída por uma superfície aplanada, correspondendo ao local onde, normalmente se encontram os depósitos sedimentares mais finos como lodos, lodos arenosos

e areias lodosas. Na zona mais profunda, o domínio da **plataforma externa** estende-se entre os -80/-90 m e o **bordo da plataforma,** definido entre os -110 a -150 m de profundidade. Os depósitos de cobertura sedimentar que se encontram no domínio da plataforma externa são, na sua grande maioria, lodos arenosos e areias lodosas.

A morfologia da plataforma continental é afetada pela presença de extensas zonas de afloramentos rochosos que delimitam os depósitos sedimentares descritos acima. Na plataforma e vertentes continentais destaca-se a presença de importantes vales submarinos, nomeadamente o canhão de Portimão. Este canhão, de orientação geral N-S devido ao alinhamento com a falha de Portimão-Monchique (Mougenot, 1989) tem um curso superior que indenta a plataforma continental em cerca de 5 km, condicionando os processos que aí ocorrem.

3. DADOS E METODOLOGIA

A análise e interpretação sismo-estratigráfica foi realizada sobre um total de 70 linhas de reflexão sísmica de alta resolução, adquiridas com sistema *Boomer*, segundo uma malha regular e uniforme, onde 33 linhas são paralelas e 37 linhas perpendiculares à batimetria, com um espaçamento médio de 4000 m entre linhas (Fig.2).



Fig. 2. Localização das linhas sísmicas.

O pré-processamento foi realizado em simultâneo com a aquisição das linhas sísmicas, e passa essencialmente pela aplicação de filtros passa-banda e ganhos do tipo TVG (*Time Varying Gain*) e a marcação do refletor do fundo marinho. O pós-processamento passou pela aplicação de mais filtros, correções de estática e maré e remoção do ruído da coluna de água.

A interpretação sismo-estratigráfica foi realizada com base nos critérios propostos por Mitchum e Vail (1977), identificando-se em cada um dos perfis os refletores que delimitam a sequência mais recente (S1), interpretada como a camada sedimentar recente, e à definição do topo do soco rochoso (SR) que corresponde às formações rochosas que constituem os níveis superiores da plataforma continental neste sector.

A unidade sísmica mais recente, S1, encontra-se delimitada entre os refletores *Bottom*, que representa a superfície do fundo marinho, e o refletor BCS, que delimita o topo de SR.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterização sismo-estratigráfica

A interpretação sismo-estratigráfica das linhas de reflexão sísmica neste sector da plataforma continental algarvia possibilitou a delimitação da unidade sísmica S1 (Fig.3).

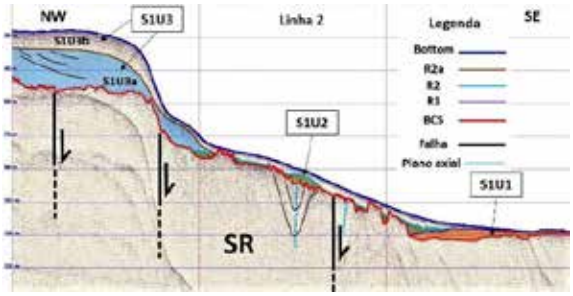


Fig. 3. Interpretação da sequência sismo-estratigráfica da linha 2. Localização na figura 2.

De acordo com a figura anterior, a unidade sísmica mais superficial, que corresponderá à camada sedimentar recente, está depositada sobre uma superfície erosiva (BCS), definida no topo da unidade sísmica SR (é caracterizada por reflexões acústicas de média a baixa amplitude e subparalelas, moderadamente contínuas; apresenta forte deformação dúctil e frágil). O refletor BCS apresenta amplitude média a baixa e é identificado em todas as linhas analisadas. A unidade sísmica S1, apresenta uma estrutura interna composta por 4 subunidades, mais ou menos desenvolvidas e refletindo processos sedimentares ocorridos durante o último ciclo sedimentar:

- **subunidade sísmica S1U1** apresenta reflexões acústicas de média a baixa amplitude com alguma transparência e, no caso em que se observam, os refletores internos são contínuos, subparalelos e sub-horizontais. É delimitado no topo pelo refletor R1.

- **subunidade sísmica S1U2** é caracterizada por uma frequência acústica baixa, onde a reflexões internas apresentam amplitudes baixas, fraca continuidade e subparalelas entre si. É delimitada no topo pelo refletor R2 que, em muitos sectores, apresenta diacronismo com o refletor BCS.

- **subunidade sísmica S1U3** pode ser dividida em duas subunidades: 1) a mais antiga, S1U3a, tem reflexões internas de baixa amplitude e ligeiramente transparente, continuidade média e subparalelas entre si. Estas reflexões internas são truncadas pelo refletor do topo R2a; 2) a mais recente, S1U3b, apresenta reflexões internas de média a baixa amplitude, com boa continuidade e subparalelas entre si. Esta é a subunidade que se observa na grande maioria de área

de estudo. É delimitada no topo pelo refletor *Bottom*, caraterizado pela forte amplitude e elevada continuidade, justificadas por se tratar da fronteira água-sedimento.

4.2. Morfologia das superfícies Bottom e BCS

A partir da interpretação realizada foram interpoladas as superfícies que delimitam a unidade sísmica S1, tendo como resultados finais os modelos digitais de terreno (MDT) das superfícies *Bottom* e BCS (Fig. 4).

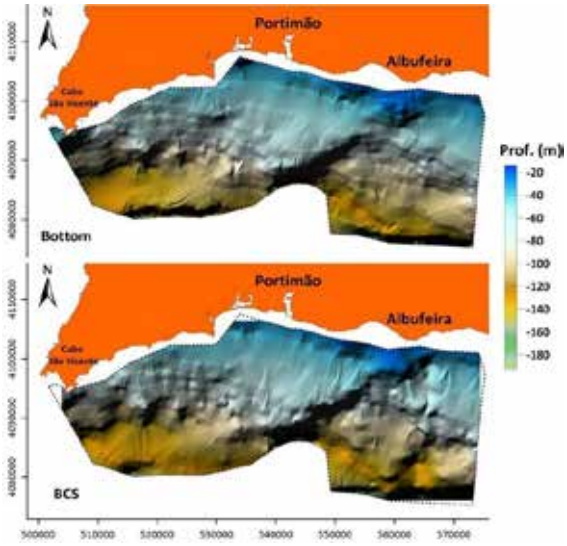


Fig. 4. Superfícies obtidas com a interpolação dos resultados exportados da interpretação sismo-estratigráfica dos refletores Bottom e BCS.

Para melhor descrever e evidenciar alguns dos aspetos que caracterizam a morfologia das superfícies *Bottom* e BCS, foram realizados e analisados um conjunto de perfis batimétricos realizados sobre os MDT respetivos (Fig.5).

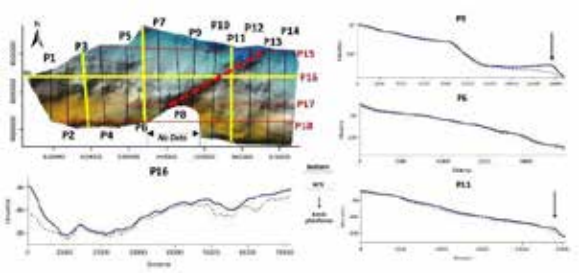


Fig. 5. MDT (Bottom) com a implantação dos perfis estudados. Exemplos de perfis batimétricos sobre as superfícies Bottom (linha cheia azul) e BCS (linha tracejada vermelha) com a localização do bordo da plataforma (seta preta). No MDT a linha tracejada vermelha indica alinhamento morfológico observado em ambas as superfícies.

Nas zonas ocidental e oriental as superfícies apresentam-se mais organizadas e escalonadas, quando comparadas com a zona central, onde a morfologia é mais suave e uniforme. Entre os -120 e -140 m de profundidade, observa-se uma nítida variação do pendor da superfície do fundo, marcando o final do domínio da plataforma externa e início da vertente continental. Esta quebra corresponde ao bordo da plataforma e está assinalada nos perfis por uma seta preta.

No geral, a plataforma continental neste sector da margem portuguesa apresenta um pendor suave (inclinação média de 0,3°), observando-se um aumento significativo desse valor na vertente da plataforma (> 4°) (Fig. 6).

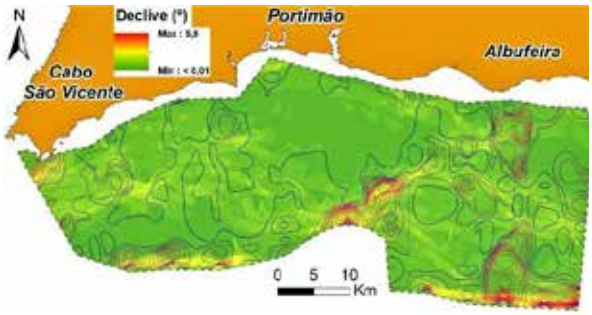


Fig. 6. Superfície de declives da superfície Bottom com as linhas de espessura da unidade S1. As zonas dos depocentros foram marcadas na gama de vermelhos.

Morfologicamente, a superfície *Bottom* e a superfície BCS são bastante semelhantes segundo a direção N-S (perfis P3, P6 e P11 da Fig.5), demonstrando uma espessura entre superfícies muito baixa (inferior a 2 m) exceto nas zonas do alinhamento NE-SW, cabo de São Vicente e em frente a Albufeira onde se atinge os 40 m de espessura (Fig.6). Nos perfis paralelos à linha de costa ambas as superfícies apresentam uma inclinação geral para W, apesar da presença do alinhamento morfológico já referido, que separa o setor oriental do setor ocidental, este último mais extenso (P16, Fig. 5).

A zona central da área é dominada pela presença da estrutura morfológica já mencionada, muito expressiva, com cerca de 27 km de comprimento e alinhada segundo a direção NE-SW. A origem deste alinhamento foi associada à presença de estruturas profundas de ascensão diapírica, já identificadas na cartografia geológica 1:1M (LNEG, 2010). No sector mais ocidental, numa extensão de ordem quilométrica, a morfologia da plataforma é sub-horizontal, sendo a distribuição da cobertura sedimentar pouco expressiva (Fig. 6).

4.3. Interpretação dos domínios fisiográficos

Foi realizada a interpretação e identificação das principais quebras de pendor (**Qp**) sobre a superfície do fundo marinho (*Bottom*). Não existe uniformidade de critérios para identificar a localização das quebras de pendor. No entanto, podem ser considerados diferentes critérios, tais como: a) a intersecção de dois planos correspondentes às superfícies adjacentes à quebra de pendor, sendo a localização desta definida pela vertical à linha de intersecção ou pela bissetriz do ângulo obtuso formado pelos planos referidos; b) a linha de maior curvatura; c) a linha corresponde ao inicio da mudança de inclinação (Dias, 1987).

Com os critérios mencionados foram identificadas três quebras de pendor principais, **Qp1**, **Qp2** e **Qp3**, que materializam os limites dos quatro domínios fisiográficos interpretados – plataforma interna, média, externa e bordo da plataforma/talude continental.

As distribuições espaciais das quebras de pendor sobre os perfis permitiram a delimitação dos domínios fisiográficos no sector da plataforma continental entre o cabo de São Vicente e Albufeira (Fig. 7).

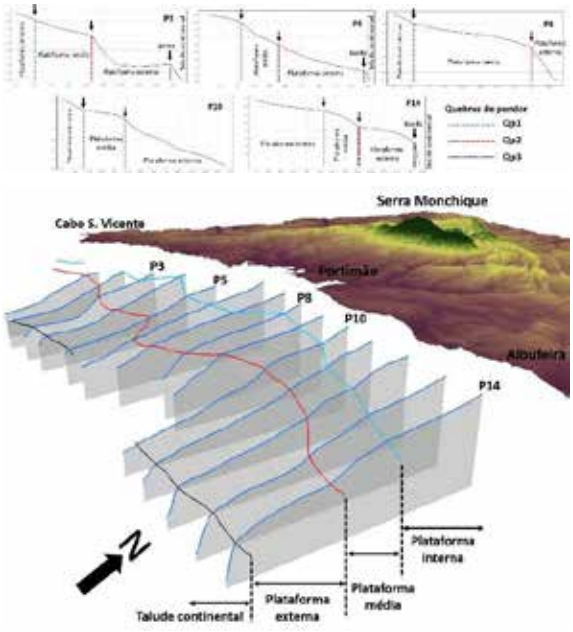


Fig. 7. Interpretação dos domínios fisiográficos sobre os perfis topo-batimétricos e sua projeção tridimensional.

O limite entre a plataforma interna e média encontra-se a uma profundidade média de -47 m, com profundidade mínima nos -38 m e máxima nos -60 m. O limite entre plataforma média e externa está compreendido entre os -69 e -100 m, com uma profundidade média de -83 m. O limite entre a plataforma externa e o bordo da plataforma varia a sua profundidade média entre os -132 e -137 m, estando compreendido entre os -121 e 148 m de profundidade. A plataforma não apresenta uma variação considerável no declive médio entre domínios (0,23° a 0, 33°), exceto na transição da plataforma para o talude continental cujo valor do declive médio é de 1,3° com um máximo de 5,5° (Tabela I).

Tabela I. Relações morfológicas entre os domínios fisiográficos.

Domínio Fisiográfico	Declive médio (°)	Declive máximo (°)	Profundidade média do domínio (m)	Profundidade média do limite entre domínios (m)
Plataforma Interna	0,23	1,3	-38	-47
Plataforma média	0,28	1,9	-62	-83
Plataforma externa	0,33	4,1	-107	-135
Talude continental	1,3	5,5	-143	

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos permitiram realizar uma comparação entre a morfologia das duas superfícies que definem a camada de sedimentos recentes e descrever os 4 principais domínios fisiográficos atuais da plataforma continental (plataforma interna, média, externa e talude continental), bem como as 3 quebras de pendor principais que delimitam os mencionados domínios.

Tendo em conta o enquadramento da área de estudo, as quebras de pendor identificadas podem estar fortemente condicionadas pela presença de estruturas herdadas do enraizamento de estruturas mais profundas que deram origem a alguns afloramentos rochosos, mas também podem demonstrar a herança e preservação de morfologias de origem em processos de geodinâmica externa como os processos de abrasão marinha ocorridos em diferentes situações eustáticas.

A pouca possança da cobertura sedimentar recente, exceto em alguns locais pontuais, mostra que a superfície atual do fundo marinho apresenta características morfológicas semelhantes à superfície da base dos sedimentos (BCS), que ficou preservada ao longo do último ciclo sedimentar.

REFERÊNCIAS

Dias, J. M. A. (1987) – *Dinâmica sedimentar e evolução recente da plataforma continental setentrional*. Dissertação para obtenção do grau de Doutoramento. Univ. de Lisboa, Lisboa. 384 pp. (*não publicado*).

IH (2009) – *Sedimentos superficiais da plataforma continental. Folha SED7 e 8 (Cabo de São Vicente ao Rio Guadiana)*, esc. 1:150 000, 2ª Ed.

IPMA (2004, 2014) – *Catálogo Sísmico de Portugal Continental e Região Adjacente (1961-1969 e 1970-2000)*. ISBN: 972-9083-12-6

LNEG (2010) – *Carta Geológica de Portugal*, escala 1: 1 000 000.

Maldonado, A. & Nelson, C. H. (1999) – Interaction of tectonic and depositional processes that control the evolution of the Iberian Gulf of Cadiz margin, *Marine Geology*, Vol. 155, pp. 217-242.

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-Applications to Hydrocarbon Exploration*. Payton, C. E. (Ed.). A A P G, Memoir 26, p. 135 – 143.

Mougenot, D. (1989) – *Geologia da margem Portuguesa*. Documento Técnico do IH. Inst. Hidrográfico, 32, 259 pp.

SGP (1992) – *Carta Geológica de Portugal* (Folha Sul), escala 1: 500 000.

Sedimentary dynamics on volcanic island shelves, a case study of Faial, Azores

E. Valente (1,2,3), R. Quartau (1,3), S. Moreira (1,3), M. Cachão (2,3), A. Bizarro (1,3)

(1) Divisão de Geologia Marinha, Instituto Hidrográfico, R. das Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. elisabete.valente@hidrografico.pt

(2) Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande 016, 1749-016 Lisboa, Portugal

(3) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, Edifício C1, 1749-016 Lisboa, Portugal

Abstract: This work discusses the results from the analysis of two marine cores from the Northwest (K20) and Southeast (K22) of the Faial Island shelf in the Azores. K20 is composed mostly by terrigenous sediments (fewer bioclastic particles) and a predominance of coarse to medium sands. K22 shows more bioclasts (29 – 49 %) than K20 (2 – 4 %), and the predominant grain size is fine to medium sand. K20 is denser and displays higher magnetic susceptibility (MS), while K22 has higher primary waves velocity (PWV). The main source of sediments in both cores is terrigenous, probably transported from the nearshore by downwelling currents derived from storms, as shown by sub-angular grains. The coarser grains and fewer bioclasts found in K20 may be explained by the prevailing and most energetic waves (NW, W). A lower hydrodynamism allows the accumulation of finer sediments and carbonated shells in K22.

Keywords: Azores Archipelago, Faial Island, insular shelf, core analysis, hydrodynamic environment

1. INTRODUCTION

Volcanic oceanic islands are normally surrounded by low gradient submarine platforms of variable width, called insular shelves, which, in reefless settings and when subjected to low rates of subsidence are formed mainly from wave erosion of the island flanks. That is the case in Faial Island shelf (Quartau et al., 2012), although, little is known about the processes governing the transport and deposition on a shelf with these characteristics. The present work aims to fill this knowledge gap and understand the sediment dynamics that occur in these shelves. With this purpose, two cores collected in distinct locations of Faial Island outer shelves were analysed in terms of grain size and composition to infer the characteristics of the environment.

2. GEOLOGICAL SETTING

Faial Island is one of the nine islands in the Azores Archipelago, located in the central North Atlantic Ocean. Faial is entirely composed of volcanic materials, which volcanic activity spans from 850 ka to the recent activity of Capelinhos in 1958. The littoral is mainly formed by rocky cliffs that often show accumulation of rock debris at their bases. These features suggest that wave erosion is the dominant process controlling the coastline position (Borges, 2003). Most nearshore areas are covered with rocky substrates (down to 30 – 50 m water depth, with median gradients ranging 3º– 4º). Below these depths, smooth sedimentary seabeds are abundant, and gradients drop to 2º. Between 70 and 120 m, median gradients increase to 11º, where the transition from the shelf to the slope can be found. The sedimentary seafloor is composed of bodies that tend to be parallel to the shore and display a cross-shore sigmoidal shape. These are thicker in the middle to outer shelf (can be up to 50 – 60 m thick) and turn thinner towards onshore and offshore. The shelf edge displays small embayments, corresponding to landslide scars (Quartau et al., 2012).

3. DATA AND METHODS

The two cores used in the present work were collected in 2011 from the Faial Island shelf (Fig. 1), during the FAIVI (Features of Azores and Italian Volcanic Islands) cruise onboard the French R/V L'Atalante. Both were retrieved with a Kulenberg piston core, one in the NW sector (K20, 3.96 m-long) and another in the SE sector (K22, 2.49 m-long) at 86 m and 103 m depth, respectively.

The physical properties (gamma density-ρ, primary waves velocity-PWV and magnetic susceptibility-MS were measured with a Geotek Multi-Sensor Core Logger-MSCL in 2014 at the University of Vigo. The non-destructive analysis was performed at room temperature and results were projected with a five data point moving average.

The cores were subsampled every ~3 cm, obtaining 135 subsamples from K20 and 66 from K22. From these, 41 samples from K20 and 31 from K22 were

splitted for grain size and total inorganic carbon analysis.

Approximately 50 g of each sample were wet sieved with a 500 µm sieve, using purified water. Each fraction was dried at 105º C, for approximately 24 h. The fraction > 500 µm was dry sieved in a column of sieves, spaced every 0.5 ϕ, from 1 ϕ (500 µm) to -4.5 ϕ (16 mm) and mechanically shaken for 10 minutes in a Retsch Vibratory Sieve Shaker AS200 Control. The fraction < 500 µm was analysed through laser diffraction with a Malvern Mastersizer Hydro 2000 G particle size analyser. Grain size statistical parameters (mean, mode and standard deviation) were calculated by the mathematical method of moments. Sediment size and sorting were respectively classified in accordance with Wentworth (1922) and Folk and Ward (1957).

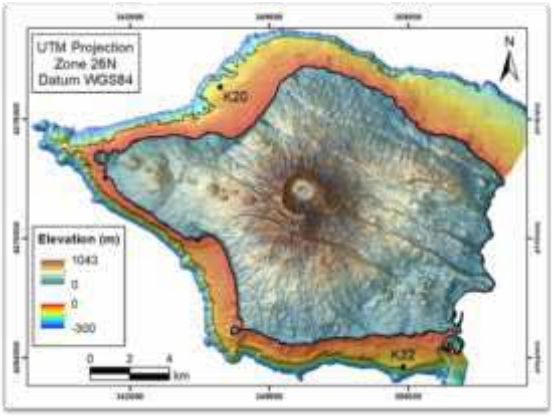


Fig. 1. Topography and nearshore bathymetry down to 300 m water depth of Faial Island. The black line depicts the coastline and the dashed line the shelf edge. Black dots locate the cores studied in this work. Adapted from Quartau et al. (2012).

For the Total Inorganic Carbon (TIC) content, subsamples were wet grinded in a Retsch Planetary Ball Mill PM100. After drying (24h at 105º), the samples were disaggregated in dry conditions. The methodology used is based in the detection of carbon dioxide released from the reaction between $CaCO_3$ and phosphoric acid, through nondispersive infrared spectrometry considering the absorbance according to Lambert-Beer's law. The apparatus used was the Skalar Primacs SNC100 analyser. The measured values were then converted into $CaCO_3$ percentages through the following equation:

$$CaCO_3\ (\%) = \frac{TIC(\%) \times 100}{12}$$

The classification used for $CaCO_3$ content was based on Baize (1993).

In order to access the frequency of terrigenous material four samples from K22 (at 222 cm, 184.5, 111 and 45 cm) were subjected to a solution containing hydrochloric acid (10 %) dissolved in ultra-purified water.

Finally, fractions from 0.5 to 1.0 ϕ and from -1.0 to -0.5 ϕ from K20, and from -1.0 to -0.5 ϕ and -1.5 to -1.0 ϕ from K22 were analysed with a magnifying microscope to access their mineral composition, grain shape, and try to identify the species organisms from the shells found.

4. RESULTS AND DISCUSSION

The results show a disparity between cores, throughout the parameters (Fig. 3 and 4). These differences lead to the definition of three distinct sections in both cores.

Sediments from K20 have higher densities (Fig. 3**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**) and are almost entirely formed by terrigenous particles (96 – 98 %), while sediments in K22 have higher percentages of $CaCO_3$ (29 – 49 %) from bioclasts, as observed through microscopic analysis. The most common mineral in bioclasts is probably calcite (density 2.7), while the most common minerals in volcaniclastic grains are olivine (density 3.3 – 3.4) and pyroxene (density 3.2 – 3.5), which could explain differences in density between cores.

Sediment composition also influences MS values, which are higher in K20 (1336 x 10^{-6} SI – 9303^{-6} SI) comparatively to K22 (451^{-6} SI – 1599^{-6} SI).

K22 has slightly higher PWV values (a maximum of 4407 m/s in K22 and 3804 m/s in K20, which are related to less porosity since average grain sizes are smaller than those of K20.

Differences in grain size and $CaCO_3$ content along the cores can represent changes in the environment. In K20, the bottom layer (up to 262 cm) showed a slight increase in the mean grain size (0.14 – 1.13 ϕ) due to gravel content increase, along with a decrease in sand and almost absence of fine particles, suggesting an increase in hydrodynamism in the environment. $CaCO_3$ content does not vary significantly at these depths (2.7 – 3.3 %). On the middle core section (from 262 to 49 cm), the mean grain size did not vary significatively, corresponding mainly to coarse sand (-0.22 – 0.67 ϕ; very coarse sand only at 175 cm) suggesting the hydrodynamism remained constant. Mud (silts and clay) content is almost absent and the $CaCO_3$ content is slightly lower compared with the previous section (2.2 – 2.8 %). In the top section, (from 49 cm upwards), the sediment becomes finer (0.59 – 2.06 ϕ). Gravel percentages drop, while silt and clay rise from close to zero to 12.19 % and sand percentages increase. $CaCO_3$ content has a slight increase (3.1 – 3.9 %), probably corresponding to a drop in hydrodynamism during this accumulation period.

Higher hydrodynamism corresponds to an increase in transport of finer and less dense particles, therefore an increase in the grain size comes along with a decrease in bioclastic material since these particles are less dense and easier to transport.

Increase in the energy of the environment may also prevent the organisms to settle, especially sessile organisms, as they live on substrate.

K20 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**sediments are mostly unimodal, except between 300.5 and 49 cm where the sediment has bimodal characteristics. The principal mode corresponds to medium and coarse sands (0.5 – 2 ϕ) while the secondary mode is coarser (-3.5 – -2 ϕ), corresponding to pebble gravel. Both modes are mainly composed of terrigenous material. The main mode could represent high energy climatic events producing downwelling currents capable of transporting nearshore sediments into the shelf and beyond (Quartau et al., 2012; Meireles et al., 2013). The secondary mode could be the presence of palimpsest sediments that were deposited during lower sea levels such as the Last Glacial Maximum when the sea was at the same depth as K20 (Quartau et al., 2012).

In K22, the bottom section (up to 160.5 cm), shows a slight decrease in the mean grain size (2.43 – 3.12 ϕ) gravel and sand contents (Fig. 4**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**). The increase in mud could be related to a decrease in the hydrodynamism in this period, allowing finer particles to deposit. $CaCO_3$ does not vary substantially at these depths (29.3 – 34 %). In the middle section, (160.5 – 45 cm deep), there is an increase in the mean grain size (1.58 – 2.98 ϕ) and gravel content while the sand content remains roughly constant. The mud content decreases in this interval, suggesting an increase in energy of the environment, allowing fine-grained particles resuspension, and reducing their deposition. $CaCO_3$ remained constant (33.2 – 41.2 %).
The top section (from 45 cm upwards) shows that sediment coarsening continues towards the seabed surface. The mud content variance is negligible, suggesting the hydrodynamism remained constant. $CaCO_3$ content was higher than in the previous section (36.5 – 48.8 %), possibly favoured by stable energy levels. K22 has a principal mode representing fine sand (2 – 3 ϕ), constant throughout the core and a secondary mode representing pebble gravel and very coarse sand (-2.5 – -0.5 ϕ), mainly with bioclastic content, that builds up towards the core's top, being constant from 81 cm up. This main mode was also present following decarbonization of the sediments although with a slightly lower mean grain size (2 – 3.5 ϕ), which shows the influence of bioclasts in the mean grain size (Fig. 2).

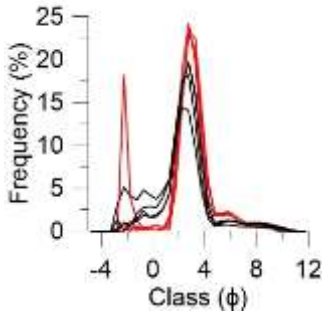


Fig. 2. Frequency of K22 samples (at 222 cm, 184.5, 111 and 45 cm) before (black) and after decarbonization (red).

The mineral composition analysis showed the presence of pyroxene, olivine and feldspar minerals. The red colour found in some lithoclasts could represent subaerial oxidation, suggesting a subaerial origin of the sediments. Therefore, these were likely derived from cliff and subaerial erosion.

The organisms found in the sediments were the same as previously found by Wisshak et al. (2015) in the Faial Channel (Foraminifera, Scleractinia coral, Serpulidae, Bryozoa, Mollusca Bivalvia, Cirripedia, vermetid Gastropoda, and Rhodophyta morphotypes).

In sum, K20 shows signs of a more hydrodynamic environment where finer and less dense particles are easily transported, coarsening the grains. This energy could be associated to strong waves produced by the NW and W winds, which are predominant and stronger in the winter (Caramelo, 2005; Quartau, 2012). K22, on the other hand displays very fine sands and a higher percentage of bioclasts, only possible to accumulate in a less energetic environment.

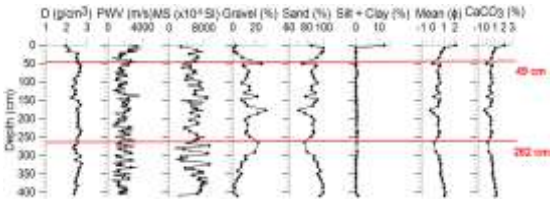


Fig. 3. Density (D), primary waves velocity (PWV), magnetic susceptibility (MS), textural and compositional variation along depth in K20. Red lines separate different sections based on differences in the parameters throughout the core.

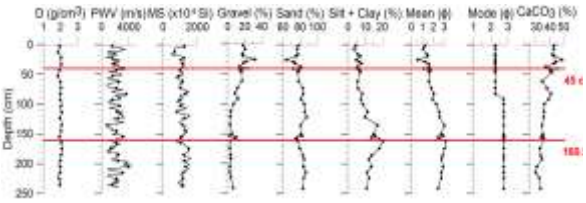


Fig. 4. Density-D, primary waves velocity-PWV, magnetic susceptibility-MS, textural and compositional variation along depth in K22. Red lines separate different sections based on differences in the parameters throughout the core.

5. CONCLUSION

The core analysis revealed differences between the northern and southern sectors of Faial shelf. These

differences could be related to hydrodynamic forces associated with waves produced by the predominant NW and W winds, which can be strong in the winter. These forces contribute to a coarsening in the grain size in the NW (K20), a more exposed site, or accumulation of bioclastic content and finer grains on the SE shelf (K22), which is more sheltered.

REFERENCES

Baize, D. (1993). Soil Science Analyses. A Guide to Current Use. Chichester, New York.: John Wiley & Sons.

Borges, P. (2003). Ambientes litorais nos Grupos Central e Oriental do arquipélago dos Açores, Departamento de Geociências. Universidade dos Açores, Ponta Delgada, p. 413.

Caramelo, L., (2005). Contribuição para o estudo hidrodinâmico do clima da Península Ibérica e dos Açores. Universidade de Aveiro. http://hdl.handle.net/10773/4833

Folk, R., & Ward, W. (1957). Brazos River Bar: A Study in the Significance of Grain Size Parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3–26. https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D

Meireles, R. P., Quartau, R., Ramalho, R. S., Rebelo, A. C., Madeira, J., Zanon, V., Avila, S. P. (2013). Depositional processes on oceanic island shelves - Evidence from storm-generated Neogene deposits from the mid-North Atlantic. *Sedimentology*, *60*(7), 1769–1785.

Quartau, R., Tempera, F., Mitchell, N., Pinheiro, L., Duarte, H., Brito, P., Bates, C., Monteiro, J. (2012). Morphology of the Faial Island shelf (Azores): The interplay between volcanic, erosional, depositional, tectonic and mass-wasting processes. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, *13*.

Wentworth, C. K. A. (1922). A Scale of Grade and Class Terms of Clastic Sediments. *The Journal of Geology,* 30, 377–392. https://doi.org/10.1086/622910

Wisshak, M., Berning, B., Jakobsen, J. et al. (2015). Temperate carbonate production: biodiversity of calcareous epiliths from intertidal to bathyal depths (Azores). *Mar Biodiv 45: 87*.

Main chemical features of submarine polymetallic nodules occurring in European Seas – results from the MINDeSEA project

P. Ferreira (1), F. Gonzalez (2), T. Kuhn (3), J. Nyberg (4), E. Marino (2), MINDeSEA Team

(1) Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Alfragide, Portugal. pedro.ferreira@lneg.pt

(2) Geological Survey of Spain (IGME), Spain.

(3) Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Germany.

(4) Geological Survey of Sweden (SGU), Sweden.

Abstract: MINDeSEA project (Seabed Mineral Deposits in European Seas: Metallogeny and Geological Potential for Strategic and Critical Raw Materials) focused on an integrative metallogenetic study of the main types of marine mineral resources (polymetallic sulphides, ferromanganese crusts, phosphorites, marine placers and polymetallic nodules) in the seabed under the jurisdiction of European coastal State. In this work we will focus on the data generated for the polymetallic nodules, wherein MINDeSEA database has listed a total of 296 occurrences. The majority is located in the Baltic Sea (184 occurrences, corresponding to 62% of the total), whereas the rest of the registered occurrences are distributed among NE Atlantic Ocean, Macaronesia, Bay of Biscay and Iberian Coast regions. We will present the major chemical features of these occurrences, and discuss the importance of their contents in terms of strategic and critical raw materials, in comparison with the main submarine polymetallic deposits in the world.

Keywords: critical and strategic elements, database, geochemistry, occurrences.

1. INTRODUÇÃO

1.1. MINDESEA Project

The project "Seabed Mineral Deposits in European Seas: Metallogeny and Geological Potential for Strategic and Critical Raw Materials" (MINDeSEA), materialized in the frame of the GeoERA Raw Materials Theme (Grant Agreement Nº 731166, project GeoE.171.001), resulted from the collaboration between eight GeoERA Partners and four Non-funded Organizations at various points of common interest for exploration and investigation on seafloor mineral deposits.

This MINDeSEA project aimed to identify the principal types of seabed mineral resources (hydrothermal sulfides, ferromanganese crusts, phosphorites, marine placers and polymetallic nodules) in the seabed under the jurisdiction of European coastal States, addressing their integrative metallogenetic study and assess the potential for marine strategic minerals and Critical Raw Materials (CRMs). The geographical scope of the project included all the regional basins around Europe comprising the Atlantic and Arctic Oceans, the Mediterranean Sea, the Baltic Sea and the Black Sea.

The objectives of the project included characterizing deposit types under the jurisdiction of European coastal States and their trace element content, evaluating supply potential, developing harmonized mineral maps and datasets of seabed deposits, producing mineral potential and prospectivity maps.

In this work we focused on the data generated on the existing occurrences of polymetallic nodules in the European margins, in order to assess the European resource potential and inventory on polymetallic nodules.

1.2. Polymetallic Nodules

Polymetallic nodules are marine sedimentary mineral deposits, composed mostly of iron and manganese, that precipitate very slowly from seawater (hydrogenetic) or from bottom sediment pore waters (diagenetic). In Addition to these two elements, the polymetallic nodules contain numerous other elements, many of which are rare and valuable metals that can reach concentrations that are economically valuable, including some critical metals, platinum group metals and the rare earth elements plus Y (REY) (e.g. Hein *et al.,* 2020).

In the first formation process, the hydrogenetic layers, that build the nodules structure, are formed by metal precipitation from oxic near-bottom seawater and/or oxic sediment pore-water, whereas in the second process, the diagenetic layers are formed by metal mobilization in the suboxic pore water and precipitation at the suboxic/oxic interface. Nodules occur that are solely hydrogenetic (as in seamounts) or solely diagenetic (as in Peru Basin), but most nodules are a combination of both (e.g. Kuhn *et al.,* 2017).

The growth rate of hydrogenetic layers is typically in the range of 1–5 mm per million years, (e.g. *Hein et al.*, 2020), whereas diagenetic layers grow

considerably faster (up to 250 mm per million years; von Stackelberg, 2000).

The chemical composition of nodules varies at different scales: on regional, local, inter and intra-nodule. In general, the chemical composition of nodules is controlled by the ratio of the hydrogenetic to diagenetic components and whether the diagenetic component results from oxic or suboxic diagenesis (e.g. Kuhn *et al.,* 2017); the location (geographic position and water depth), and the growth rate can also influence the nodules' chemistry.

Hydrogenetic nodules have Mn/Fe ratios ≤5 (Halbach *et al.,* 1989) and high contents of high field strength elements such as Ti, REY, Y, Zr, Nb, Ta, Hf as well as elements that can be oxidized on the surface of Mn oxides such as Co, Ce, and Te, low Y/Ho and high Th/U ratios (e.g. Kuhn *et al.,* 2017; Hein *et al.,* 2020).

Diagenetic nodules are characterized by much higher Mn concentrations than in hydrogenetic nodules, with Mn/Fe ratios >5 (Halbach *et al.,* 1989). Traditionally, Ni and Cu have been the metals of greatest economic interest (with concentrations reaching more than 1wt%), but this type of nodules are also significantly enriched in Ba, Zn, Mo, Li, and Ga (Lithium is especially high in diagenetic nodules, averaging 311 ppm in Peru Basin nodules (Hein *et al.,* 2020)). Other geochemical characteristics include: low Co and Ce concentrations, high Y/Ho ratios and low Th/U ratios (e.g. Kuhn *et al.,* 2017).

Polymetallic nodules occur throughout the global ocean, from the flanks of seamounts to the abyssal plains of the deep ocean. They are also known from shallow seas such as the Baltic Sea and from freshwater lakes, but these nodules have considerably lower contents of valuable metals (e.g. Kuhn *et al*., 2017). Predominantly, polymetallic nodules occur as potato-shaped concretions on the surface of sediment-covered abyssal plains, at water depths of approximately 3500 to 6500 m, forming two-dimensional deposits on top or within the first 10 cm of the deep-sea sediments. The most extensive deposits have been found in the Pacific Ocean, especially between the Clarion and Clipperton Fracture Zones (CCZ), the Peru Basin (PB), and Cook Islands EEZ (CI-EEZ); a large nodule field also occurs in the Central Indian Ocean basin (CIOB). These four deposits are the only know nodule fields of economic importance.

The CCZ and Central Indian Ocean Basin nodules, which represent mixed hydrogenetic-diagenetic nodules, have similar compositions, with high Mn, very high Ni and Cu, and moderate Co, Mo and Li contents (e.g. Hein *et al.,* 2020). Nodules from the Peru Basin, which primarily form through diagenetic processes, are characterized by high Mn and very high Ni and Li contents and the Cook Islands EEZ nodules, which primarily form through hydrogenetic precipitation, have the highest Ti, Co, Y and total REY content of the three nodule types (Hein *et al.*, 2020).

1.3. Critical and Strategic Elements

In recent years, certain metals have been designated as 'critical', primarily owing to their economic and strategic importance and likelihood of supply shortage, due to the very-high import dependence and high level of concentration of some critical raw materials in particular countries. This risk is also coming from the fact that there is a lack of (viable) substitutes, due to the very unique and reliable properties of these materials for existing, as well as future applications. Critical Raw Materials (CRMs) have a significant economic importance for key sectors in the European economy. In September 2020, Europe has considered 30 resources as CRMs, of which Co, Heavy and Light Rare Earth elements, Nb, P, Sc, V, Li and Ti can be strongly enriched in polymetallic nodules (e.g. Hein *et al.,* 2020; Kuhn *et al.*, 2017).

Strategic elements are those that are usually defined as vital to modern technology, defense and industry and that have a high economic importance. They are also required for technological and industrial developments, but are in short supply and have no known substitutes. Comparatively to the CRMs, above defined, what distinguish the strategic elements from them is the fact that the supply risk is lower for the strategic elements. Several strategic elements were identified has having the potential to be enriched in the polymetallic nodules, which include: Mn, Cu, Ni, Zn and Mo.

All these elemental concentrations were compared with those existing in the four main marine mineral deposits for the polymetallic nodules, referred above: Cook Islands EEZ (CI-EEZ), Peru Basin (PB), Clarion Clipperton Zone (CCZ) and Central Indian Ocean Basin (CIOB).

2. RESULTS

MINDeSEA database has listed a total of 296 polymetallic nodules occurrences. The majority is located in the Baltic Sea (184 occurrences, corresponding to 62% of the total) followed by North East Atlantic Ocean, having 68 recorded occurrences (23% of the total). The remaining occurrences (15%) are distributed through other five marine regions/sub regions. Taking into account all the chemical data compiled, the MINDeSEA database listed a total of 493 chemical analyses for polymetallic nodules, sampled in 107 distinct locations.

Considering the spatial and density distribution of the polymetallic nodules compiled inside the MINDeSEA project, five metallogenetic areas were defined: 1) Barents Sea, 2) White Sea, 3) Baltic Sea, 4) Black Sea and 5) Biscay Bay and Iberian Margin

(Fig. 1). Here we present the main chemical features of polymetallic nodules for each metallogenetic area.

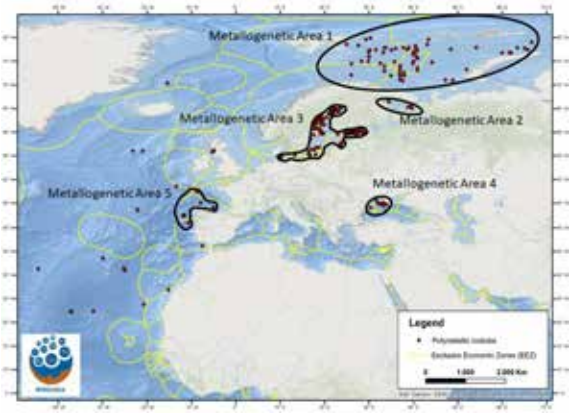


Fig. 1. Spatial distribution of polymetallic nodules occurrences, in relation to the EEZ's, compiled inside the MINDeSEA project, and the main metallogenetic areas defined.

1. Barents Sea

The nodules are significantly more enriched in Fe (8.6-17.5 wt%), comparatively to Mn (0.02-0.14 wt%), giving very low Mn/Fe ratios (0.001-0.008), which are typical of polymetallic nodules of hydrogenetic origin. However, when considering the genetic diagram of Bau *et al*. (2014), using the available REY, where Ce_{Sn}/Ce_{Sn}* is plotted against Nd, some data points indicated a diagenetic origin, showing that using distinct elements produced distinct origins for these nodules. Considering the abundances of available strategic and critical elements for this region, P concentrations vary between 1.2 and 3.1 wt%, which are higher than those presented by the nodules of the Cook Islands region, Peru basin, CCZ and CIOB (all with P average concentrations <0.32 wt%). Total REY concentrations range between 0.004 and 0.014 wt%, which are well below the corresponding concentrations (0.040-0.168 wt%) found in those four iconic areas referred above. Mn, as described above, have very low concentrations (0.02-0.14 wt%). Interesting concentrations of V (~820 ppm) are observed.

2. White Sea

In this area only four Polymetallic nodules occurrences were identified and none of them have any chemical data associated. All samples were collected at shallow depths (42-226 mbsl).

3. Baltic Sea

About 62% of all polymetallic nodules occurrences listed in the MINDeSEA database are from the Baltic Sea. From these, about half of the occurrences (99 in total) are from Gulf of Bothnia, 57 occurrences are from Gulfs of Finland and Riga; the rest, 27 occurrences, are from the Baltic Sea proper, including Kiel Bay. Concerning the genetic origin of the nodules from this region, distinct results are obtained: when applying the ternary diagram of Bonatti *et al*. (1972) ((Co+Cu+Ni)*10 – Fe – Mn), the majority of the data points are distributed in the hydrothermal field, but when Ce_{Sn}/Ce_{Sn}* is plotted against Nd (Bau *et al*., 2014), almost the entire population of the corresponding data points are plotted inside the diagenetic field. No distinction is observed among the three sub-areas of the Baltic Sea.

In respect to the potentiality of these metallogenetic areas for some critical elements, it can be referred that only P and REY elements have interesting concentrations. With the exception of the nodules from the Gulf of Finland, the highest REY total concentrations of the Baltic sea, only obtained for two samples (0.056 and 0.072 wt%), have higher values when compared to Peru basin (with average concentrations of 0.040 wt%). However, the rest of all REY concentrations are below 0.037 wt%. The three other reference regions have a REY variation between 0.081 and 0.168 wt%, well above those observed in the Baltic Sea nodules. Globally, the P concentrations are above those observed for all the reference regions (0.15-0.34 wt%) and one sample from Baltic Sea proper has the highest P concentration (~10 wt%) of all nodules samples listed in the MINDeSEA database.

Concerning the strategic elements, only Mn and Zn show have high potentiality in the Baltic Sea. The highest Mn concentrations are found in the Baltic Sea proper, which can reach values of 32.35 wt%. The maximum concentrations in the other two sub-areas are lower (Botnhia Gulf ~17 wt%; Finland Gulf ~25 wt%). In all three sub-areas, there is a serial variation in Mn concentrations up to the lowest concentrations. When compared to the reference regions, only Peru basin shows higher Mn concentrations than Baltic Sea. Only in the Bothnia Gulf sub-area high Zn concentrations are found – two nodules samples are completely out of the general variation for this element observed in the other metallogenetic areas or reference regions, showing concentrations of ~7000 and 10000 ppm. These are the richest Zn concentrations found in the MINDeSEA nodules database. When considering the Zn values in the Baltic Sea proper sub-area, it can be observed that they are in the range found among the reference regions.

4. Black Sea

In this region, the nodules have high Fe concentrations (18.36 - 37.77 wt%) and low Mn concentrations (1.02 - 10.17 wt%). The Fe/Mn ratios have low values (0.05 - 0.49), which are indicative of a hydrogenetic origin. This genetic process is, in part, confirmed by the relationship among Co+Ni+Cu, Fe and Mn, in the ternary diagram from Bonatti *et al.* (1972), with some samples located in the hydrogenetic field defined there. However, other samples show a hydrothermal input. The available REY data, when plotted in the Bau *et al.* (2014) diagram, are plotted in the diagenetic field. Hence,

considering the genetic origin for these polymetallic nodules, the results are dubious once different conclusions are obtained from the different relationships among the elements that were considered.

For this metallogenetic area only the critical element P has concentrations (1.75 – 2.57 wt%) that stand out from the MINDeSEA listed chemical data and, additionally, are higher than those observed for the four reference marine regions (0.15-0.34 wt%). Co concentrations (0.081-0.250 wt%) are only below those defined for CI-EEZ (showing an average value of 0.411 wt%), being in the range observed for the other three reference regions. With respect to the strategic elements, all have low concentrations in this region.

5. Biscay Bay and Iberian Margin

This metallogenetic area includes the southern part of the Biscay Abyssal Plain and the eastern part of the Iberia Abyssal Plain. Two distinct types of chemistry are found: some occurrences have nodules enriched in Fe (~39 - 67 wt%) and with low Mn concentrations (~0.1 – 5 wt%), producing low Mn/Fe ratios (< 0.13). Conversely, in the other occurrences, the nodules are very enriched in Mn (~39 – 43 wt%), have very low Fe contents (~0.3 – 1 wt%) and the corresponding Mn/Fe ratios have high values (~40 and 120). This chemical dichotomy is equally well expressed in the ternary diagram relating (Co+Ni+Co), Fe and Mn (Bonatti *et al.,* 1972), and considering the relationship between Ce_{Sn}/Ce_{Sn}* and Nd (diagram of Bau *et al*., 2014). In the western Galicia continental margin, the polymetallic nodules occur together with extensive phosphorite pavements on seamounts and banks existent there (González *et al.,* 2016). The formation of these nodules and phosphorites is at least partly related to the activity of deep-reaching faults and the geothermal mobilization of metals from a deeper crustal reservoir (González *et al.,* 2014, 2016).

The most interesting metal concentrations – Co, Mn, V and Cu – are obtained in the samples having the highest Mn/Fe ratios from Galicia Bank. Special emphasis should be given to the high potentiality of this area for Co, V and Mn. These three elements have in this area the highest concentrations of all the occurrences listed in MINDeSEA database. Co (1.801 and 1.123 wt%) and V (1740 and 2988 ppm) concentrations obtained in two sample locations have the highest values from the entire MINDeSEA database. These values are inclusively well above those shown by the four reference regions (with concentrations ranging from 0.111 to 0.411 wt% for Co and 431 to 508 ppm for V). The two highest Mn concentrations (38,65 and 43,10 wt%) are higher than those observed in Peru basin (average of 34.2 wt%), which is the reference region with the highest Mn contents. In relation to the other metallogenetic regions, Cu concentrations (0.155 and 0.180 wt%), are only exceeded by those observed in Rockall Plateau, Madeira Abyssal Plain, Kane FZ and in the Lochs Goil and Striven (which as a whole range from 0.190 to 0.247 wt%). However, the range of Cu variation for Galicia Bank is lower than any observed in the four reference regions (showing a compositional interval between 0.226 and 1.701 wt%).

MINDeSEA data for polymetallic nodules indicate that several critical and strategic elements (P, V, REY, Co, Mn, V, Cu, Ni and Ti), having significant potential as metal resources, are associated to some European marine areas. However, with the exception of the Baltic Sea, the available data is still scarce. To overcome this fact, carrying out oceanographic exploration campaigns would be crucial for the near future.

MINDeSEA database can be explored in the following website: https://geoera.eu/projects/gip-p/overall-geoera-map/

Acknowledgements
This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 731166.

REFERENCES

Bau, M. *et al.* (2014). Discriminating between different genetic types of marine ferro-manganese crusts and nodules based on rare earth elements and yttrium, Chemical Geology, 381, 1-9.

Bonatti, E. *et al.* (1972). Classification and genesis of submarine iron-manganese deposits. In: D.R. Horn (ed.), Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor. Natl. Sci. Found., Washington, D.C., 149-160.

González, F.J. *et al*. (2016). Phosphorites, Co-rich Mn nodules, and Fe-Mn crusts from Galicia Bank, NE Atlantic: reflections of Cenozoic tectonics and paleoceanography. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 17, 346-374.

Halbach, P. *et al.* (1989). Cobalt-rich and platinum bearing manganese crust deposits on seamounts: Nature, formation, and metal potential. Marine Mining, 8, 23–39.

Hein, J.R., Koschinsky, A. e Kuhn, T. (2020). Deep-ocean polymetallic nodules as a resource for critical materials. Nature Reviews Earth & Environment, 1, 158-169.

Kuhn, T., *et al.* (2017). Composition, Formation, and Occurrence of Polymetallic Nodules. In: R. Sharma (ed.), Deep-Sea Mining: Resource Potential, Technical and Environmental Considerations. Springer International, 23 – 64.

Water column suspended sediment concentrations in the Western and Southern Portuguese shelf under winter conditions

R. Santos (1), A. Oliveira (1,2), A.I, Santos (1), N. Zacarias (1), A. Mateus (1)

(1) Instituto Hidrográfico. Lisboa-Portugal. rita.santos@hidrografico.pt
(2) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Abstract: AQUIMAR aims to delimit offshore/inshore potential aquaculture sites in Portugal. Based on AQUIMAR data, this work aims to characterize suspended sediment concentration (SSC) in two distinct areas (western and southern Portuguese continental shelf) under different oceanographic and meteorological scenarios between 2018 and 2020. TS (temperature vs. salinity) diagrams and SSC were analysed in the main nepheloid layers (surface and near bottom), showing maximum SSC values of 3.60 mg/l at the surface and with higher values near the bottom (maximum 8.85 mg/l). In March 2020, the coldest, less saline waters were observed associated with the Mondego River discharge at the surface and SSC maxima was found in the same area, near the bottom. Contrastingly, in the Algarve Shelf, no clear evidence of the effect of River discharge could be inferred from the March 2020 dataset.

Keywords: CTD, water column, suspended sediment concentration.

1. INTRODUCTION

AQUIMAR (*Caraterização Geral de áreas AQUIcolas para estabelecimento de culturas MARinhas*) Project aims to delimit the best potential areas for aquaculture infrastructure implementation along the Portuguese margin. To delimit these areas, it is necessary to know the main characteristics of the marine system, namely in the fields of physical, biological, chemical, and geological oceanography. This project comprises five pre-defined areas along the Portuguese shelf (from north to south): (A) Viana do Castelo to Leixões; (B) Aveiro to Figueira da Foz; (C) Peniche; (D) Setúbal to Sines; and (E) in the Algarve shelf.

The Portuguese margin is influenced by diverse oceanographic conditions and river contributions. In the western margin, the shelf receives the freshwater contributions from several rivers: Minho, Lima, Cávado, Ave, Douro, Mondego, Tejo, and Sado. On the other hand, southern Portugal and southwestern Spain is only influenced by two major rivers Guadiana and Guadalquivir (Fiúza, 1984). River discharges originate a low salinity (S < 35.7) lenses that extend along the coast, known as the Western Iberian Buoyant Plume (WIBP). The WIBP can be present throughout the year, even under summer upwelling conditions (Peliz et al., 2002). According to Fiúza et al. (1998) the Portuguese margin is influenced by the Eastern North Atlantic Central water (ENACW), that occupies the first 1000 m of water column, formed by two different branches: $ENCAW_{st}$ (warmer and saline) and $ENCAW_{sp}$ (less saline and colder). Below this water mass lies the Mediterranean Water (MW), characterized by high salinities and temperatures, at depths ranging from 600-1500 m. Water circulation along the Algarve coast is characterized by the alternation of eastern and western currents, with the eastern counter-current responsible for the episodically warming up of waters in summer/autumn. This warm counter current, typical of easterlies winds, invades the zone off S. Vicente Cape (CSV) and displaces the cold upwelled water towards the offshore (Relvas and Barton, 2002).

In this work we aim to characterize suspended sediment concentration (SCC) variability in two contrasting areas: Area B located at the western coast (between Aveiro and Figueira da Foz) and area E in the southern coast (Algarve), during the winter of 2020 AQUIMAR survey (March 2020).

2. METHODS

2.1. Field work

In the scope of AQUIMAR four scientific surveys were carried out between October 2018 and March 2020: (i) 5 - 26 October 2018; (ii) 13 April to 14 May 2019; (iii) 7-31 October 2019; (iv) 24 February to 20 March 2020. During these surveys, a CTD (conductivity, temperature, and depth) probe was deployed at several stations covering the five study areas. The CTD probe was an *Idronaut OCEAN SEVEN 320Plus WOCE-CTD* coupled with a turbidity sensor and a *General Oceanics* 10 Niskin bottle rosette sampler, which allowed for water sample collection at several depths. In study areas B and E (Figure 1), a total of 693 CTD stations were occupied (250 stations in area B and 443 in area E). In area E, data for the October 2019 survey was not used in this work due to a problem of processing data from it.

2.2. Instrumental data processing

CTD datasets were saved in a specific format of the REDAS software and then converted to ASCII (.txt) format and processed (data cleaning, sensor calibration, time lag adjustments, filtering and salinity calculation) using a specific program developed by the Oceanography Division at Instituto

Hidrográfico, which includes data quality control. Suspended sediment concentration (SSC) was determined by filtering water samples collected at two main nepheloid layers: surface and near bottom. Turbidity data was calibrated using SSC values determined at the same stations and converted to suspended sediment concentrations (Oliveira *et al.*, 2020).

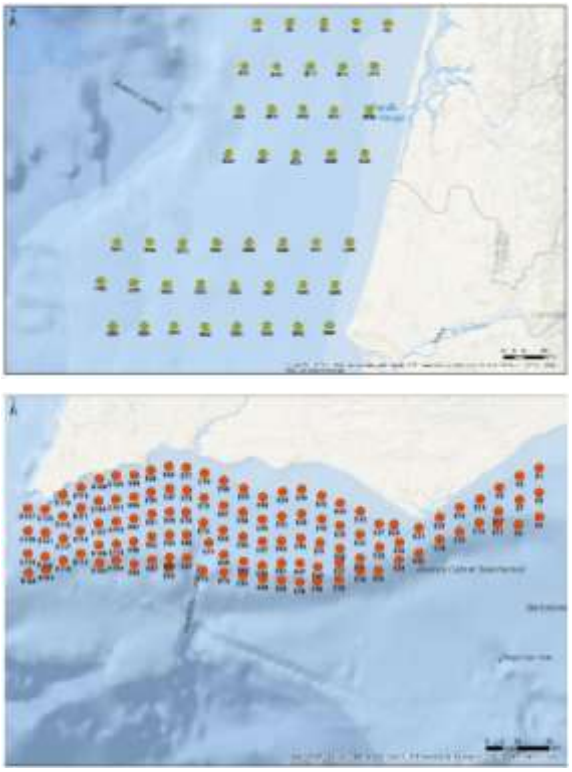


Fig.1. Top: CTD cast and sampling position in area B (western coast) in March 2020. Bottom: CTD cast and sampling position in area E (in the southern area) in March 2020.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Figures 2 through 7 show the variability of salinity, temperature and SSC for the two study areas B (Aveiro-Fig. Foz) and E (Algarve). No clear patterns of maxima/minima between both considered depth levels, study areas or among different seasonal scenarios could be inferred from the presented box-whisker plots. Among all the considered seasonal scenarios, March 2020 stands out in Area B since it presents the higher range of SSC variation at the surface, as well as presenting a clear low salinity plume associated with the River Mondego discharge. Due to these interesting results, this particular survey dataset will be discussed in greater detail in the next paragraphs, focusing on the regional disparities between Areas B and E.

3.1. Northern area (area B) – Between Aveiro and Figueira Foz

As mentioned higher variability is found in surface salinity and bottom SSC in area B. At surface levels water temperature doesn't show a significant variation, with values varying between 13.9-14.8ºC. Near the bottom temperatures varies between 12.8ºC-14.2ºC, with colder water than on the surface. During this survey, surface salinity varies significantly between 34.7-36, with lowest values detected in the stations closer to the Mondego river mouth (Fig. 3, 4 and 5) and all along the inner shelf (horizontal distribution not shown). Lower salinity values result from the fresh water contribution of major rivers (in this case the Mondego) to the shelf and can be an evidence of the WIBP lens characterized by low salinity values that occur along the coast (Peliz et al., 2002).

SSC presents higher values near the bottom (Fig. 2. and Fig.3.), with a maximum of 8.9 mg/l in station B66 (Fig. 4.), closest to the Mondego River mouth. Near the surface the maximum SSC is also detected in station B66 at 3.3 mg/l. These maxima near the coast and associated with the Mondego River discharge can be the combined result of higher energy hydrodynamic conditions and the contribution of river fresh water discharge associated with higher particle load (Fiúza, 1984).

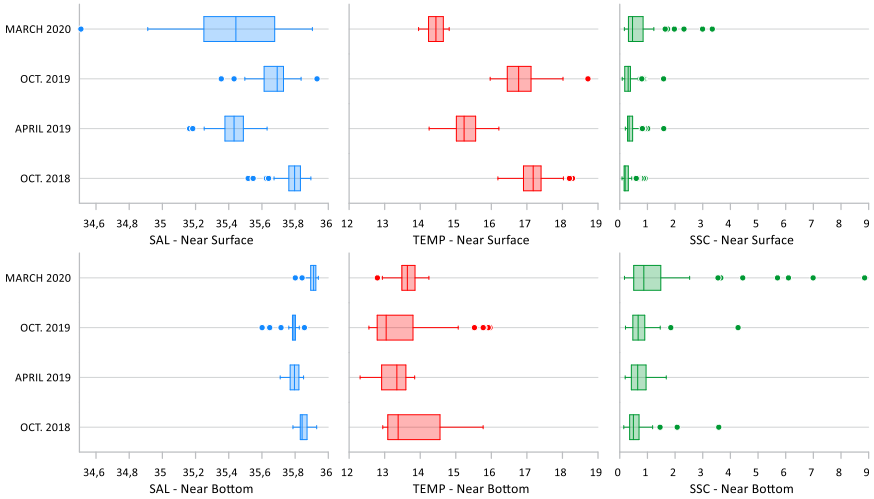


Fig. 2. Variation of salinity (SAL), temperature (TEMP – ° C) and Suspended Sediment Concentration (SSC – mg/l) at near surface and near bottom statistical box and wisker plots (with median, minimum/maximum values and outliers) in area B.

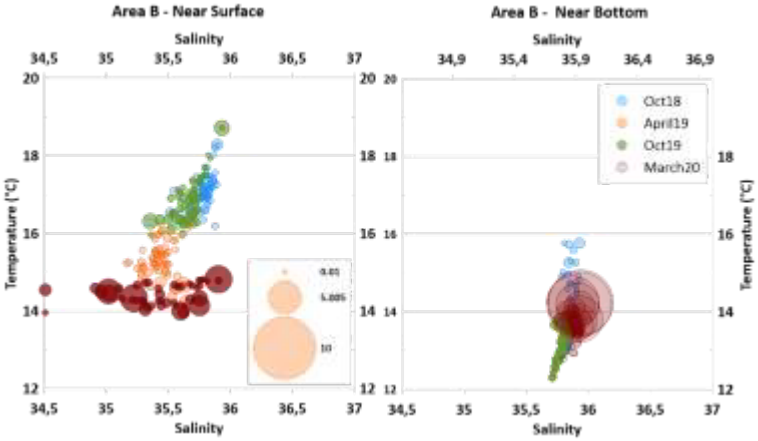


Fig.3. TS diagrams in area B with an associated value of SSC for 4 surveys.

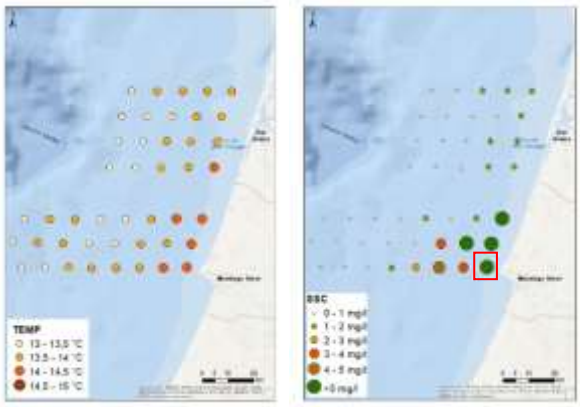


Fig. 4. Left: Spatial variation of Temperature (TEMP) at surface. Right: Variation of SSC with station B66 represented by the red squad near the bottom during the survey March 2020.

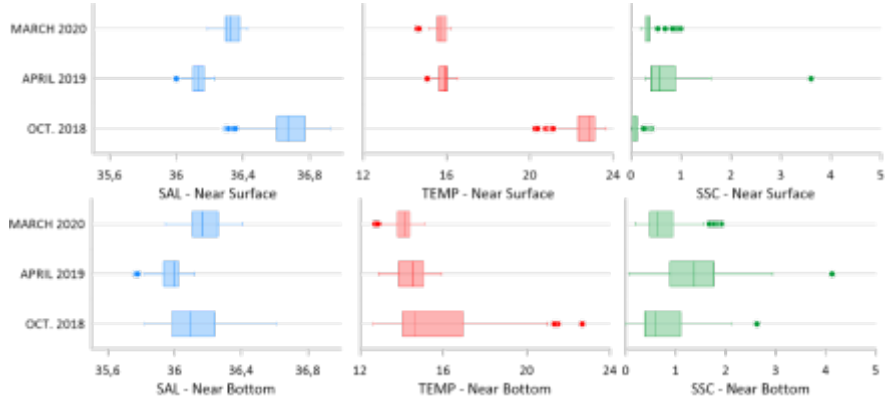


Fig. 5. Variation of salinity (SAL), temperature (TEMP – ° C) and Suspended Sediment Concentration (SSC – mg/l) at near surface and near bottom statistical box and wisker plots (with median, minimum/maximum values and outliers) in area E.

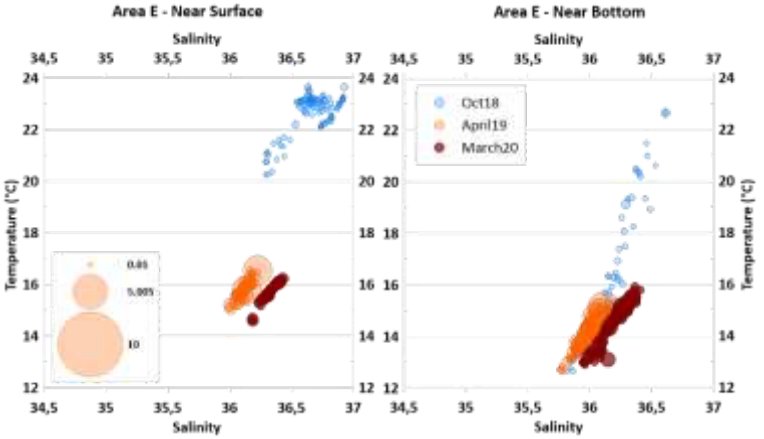


Fig.6. TS diagrams in area E with an associated value of SSC (mg/l) for 3 surveys.

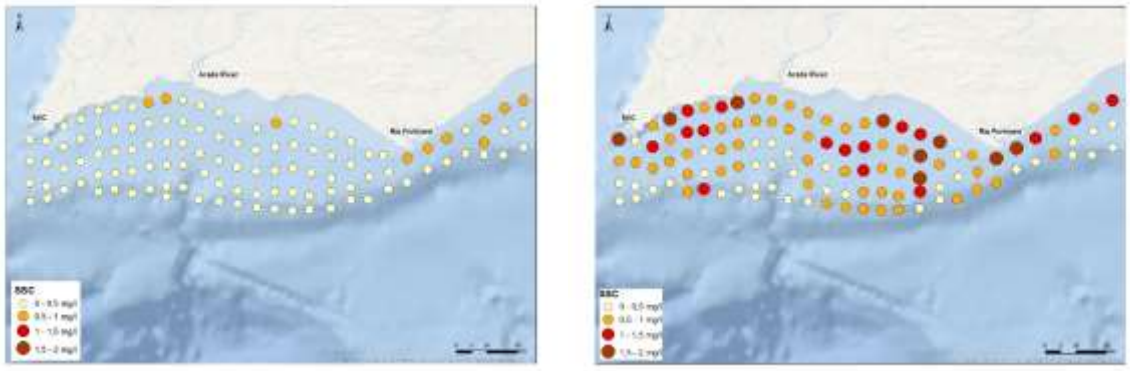


Fig. 7. Left: Spatial variation of SSC near Surface. Right: Spatial variation of SSC near bottom in area E during survey March 2020.

3.2. Southern area (area E)- Algarve

Contrasting with the northern Area B, this area show low temperature and salinity variability during March 2020. Near the surface, temperatures varies between 14.6ºC-16.2ºC and salinity between 36.2-36.4. Suspend sediment concentrations are low (<1 mg/l) near the surface, with values between 0.75 mg/l and 1 mg/l occurring near the coast in the area closest to the Ria Formosa and Guadiana river mouth, not showing a clear reflection of freshwater discharge (Fig.7). Near the bottom higher variation in temperature and salinity is observed in comparison with surface (Fig.5 and 6). Water temperature is colder near the bottom, with values between 12.9 ºC – 15.9 ºC and less saline with values 35.9 – 36.4. Suspended sediment concentration <1.9 mg/l, with disperse values between 1-2 mg/l in stations throughout the shelf and not concentrated near the coast (Fig. 7).

4. FINAL REMARKS AND FUTURE WORK

In area B, during the 2020 survey (winter scenario), the influence of the river waters discharge from the Mondego river is significant, and has a reflection on SSC at both surface and near bottom levels. Higher SSC values near the bottom, suggest a more hydrodynamic conditions, typical of western Iberian winters. Contrastingly, in the Algarve Shelf, no clear evidence of river discharge could be inferred from SSC variability, or from salinity data under these same winter conditions. These results confirm the disparity between these two regional scenarios and the lower influence of continental discharges in the southern Algarve shelf.

Future work will focus on the detailed description of the remaining three surveys as well as building conceptual models of suspended sediment dynamics for each one of the AQUIMAR study areas, in order to provide decision makers with the appropriate information necessary to delimit potential aquaculture sites.

Acknowledgements

The authors want to thanks to the Project MAR2020 nº MAR-02.01.01-FEAMP-017 – AQUIMAR – Caraterização geral das áreas aquícolas para estabelecimento de culturas marinhas. The first author benefits of a research fellow in the aim of AQUIMAR project. Appreciate all teams involved in the sampling and laboratory process, and to the elements of Portuguese Navy crew.

REFERENCES

Fiúza, A, F.G., Hamann, M., Ambar, I., Díaz del Río, G., González, N., M.Cabanas, J. (1998). Water masses and their circulation off western Iberia during May 1993. *Dee-Sea Research I*, 45, 1127-1160.

Fiúza, A.F.G. (1984). Hidrologia e Dinâmica das águas costeiras de Portugal (Hydrology and Dynamics of the Portuguese coastal waters). Ph.D. Dissertation, Universidade de Lisboa, 294.

Oliveira, A., Santos, A.I., Oliveira, P.B., Zacarias, N., Amorim, A. (2020). Dynamics of Nepheloid layers associated with internal wave activity off Figueira da Foz. 6as Jornadas de Engenharia Hidrográfica/1as Jornadas Luso-Espanholas de Hidrografia, 273-275.

Peliz, A., L. Rosa, T., P.Santos, A., L.Pissarra (2002). Fronts, jets, and counter-flows in the Western Iberian upwelling system. *Journal of Marine Systems*, 35, 61-77.

Relvas, P., Barton, E.D. (2002). Mesoscale patterns in the Cape San Vicente (Iberian Peninsula) upwelling region. *Journal of Geophysical Research*, 107, 3164.

Grain-size analysis by a dynamic image analyzer

J. Pombo (1), A. Rodrigues (1)

(1) Instituto Hidrográfico. joaquim.pombo@hidrografico.pt

Abstract:

Grain-size analysis through dynamic image analysis is a methodology that allows the conversion of images of particles with relative motion into binary images, each particle being separated and its dimensions measured individually.When compared to the classical sieving technique, this new method presents obvious advantages, allowing great savings in resources and a significant increase in productivity. Beyond the particles size, this method also allows for the complementary analysis of the grain shape, a property related to its nature and origin, being of extreme importance in any geological and geotechnical study. In this paper, the implementation and numerical validation of this method is presented, applied to particles with dimensions between 20 µm and 30 mm, using the Camsizer® P4 analyser, recently acquired by the Hydrographic Institute.

Keywords: dynamic image analysis; particle size, particle shape.

1. INTRODUCTION

The analysis of sediment texture is an important and fundamental test to achieve the classification and understand environmental processes. The textural properties (grain-size and shape) are important parameters to perform stratigraphic, palaeo-environmental, geological studies and geotechnical engineering (Bandini *et al.,* 2017; Zhang *et al.,* 2017; Shang *et al*., 2018; Wang *et al.,* 2019; Mattheus *et al.,* 2020; Wei *et al.,* 2020; Suescun-Florez *et al.,* 2020).

In the last decade, Dynamic Image Analysis (DIA) of grain-size has had a great evolution, due to obvious advantages, increasing the productivity, economy and most of all improving the accuracy and reproducibility of particle size analysis. Additionally, this technique also allows the simultaneous and automatic analysis of particle shape. With these possibilities, DIA has become a widely used method for routine analysis of particle size and shape in many industries (Microtrac Retsch, no date) and results of the DIA grain-size analysis shows a good correlation with other techniques such as sieve analysis and laser diffraction (Ilic *et al*. 2015; Ulusoy and Igathinathane, 2016).

In this paper, we present the implementation of grain-size analysis method for particles (dimensions between 20 µm and 30 mm), using Microtrac's Camsizer® P4 analyser, and the respective analytical validation, performed under the referential NP EN ISO/IEC 17025:2018.

2. TEST APPARATUS & METHODOLOGY

A Camsizer® P4 was used for capture of images and to provide unambiguous direct measurements on size and shape (Fig. 1). The equipment manufactured by Microtrac MBR has a dual high-resolution camera (Basic and Zoom camera).

Particle size distribution were obtained following ISO 13322-2:2021 for DIA through a method of a free-falling system, according the next particle sizing workflow:

1. Sub-sampling of bulk samples with a sample splitter, according ISO 14488:2007(E);
2. The representative specimens are poured into a funnel connected to a vibrating feeder.
3. The feeder disperses the particles and drops them onto the focal plane of the image capture equipment.
4. The measurement area is illuminated with high intensity LED strobe light source (90 Hz) allowing extremely short exposure times and very sharp images with optimum depth of focus and strong contrast.
5. Dual high-resolution cameras (basic and zoom cameras) provide 60 images per second. The images are consecutively numbered and automatically saved during the measurement as *.bmp files.
6. The particles, captured in the images, were segmented by the software and classified as individual particles.





Fig. 1. Above: CAMSIZER® P4 IH analyzer; below: example of free-fall system and principle CAMSIZER® measurements (Whitepaper - Microtrac Retsch GmbH, downloaded 04-2022).

3. TESTED MATERIAL

The accuracy and instruments qualification should be verified before starting any routine analysis. The adopted method for the validation consisted in checking the trueness and repeatability. In this phase, the following actions were performed:

Calibration of the Camsizer® P4 with a certified reticule for the measurements compliance test, in accordance with the quality guidelines defined by the supplier. The conversion from pixels of the instrument to micrometres was done with this tested and certified calibration reticule (Fig. 2).



Fig. 2. Certified calibration reticule traceable to International System (SI).

The repeatability was verified according the method described in the ISO 13322-2:2021, consisting in the execution of 20 to 30 consecutive measurements with different aliquots of the same sample. Ottawa sand #20-30 was selected because this is a commonly referenced material in geotechnical works. It consist in a naturally silica sand, with rounded particles, mechanically sorted, classified as poorly graded sand (SP) according to ASTM D2487 (Fig. 3). The sample mass employed in each test was around 20 g, in line with the mass of the CRM IA30 and suggested by Li and Iskander (2020).

The trueness was verified by a qualification test, where, two CRMs of glass spherical particles was analysed:

- The CRM IA035 (60 g) is a monodisperse particles soda-lime glass microspheres range 1400 – 5000 µm (Fig. 4);
- The CRM IA030 (20 g) is a multi-modal particles glass microspheres with grain-size between 500-2000 µm (Fig. 5).

4. RESULTS AND DISCUSSION

Particle size distributions were obtained following ISO 13322-2:2021. The individual and cumulative distribution employ a volume distribution, assuming that all particles are spheres (CRM IA030 and CRM IA035) and irregular (Ottawa sand #20-30). Moreover, the particle width was determined from the narrowest of all measured chords ($X_{C\,min}$).

The number of Ottawa sand images ranged between 4515 and 8734 allowing the analysis of 53311 to 113500 particles (basic camera) and 6240 to 12730 (zoom camera). The grain-size distribution and the statistical parameters of the Ottawa sand #20-30 are presented in the Fig. 3 and Table I.

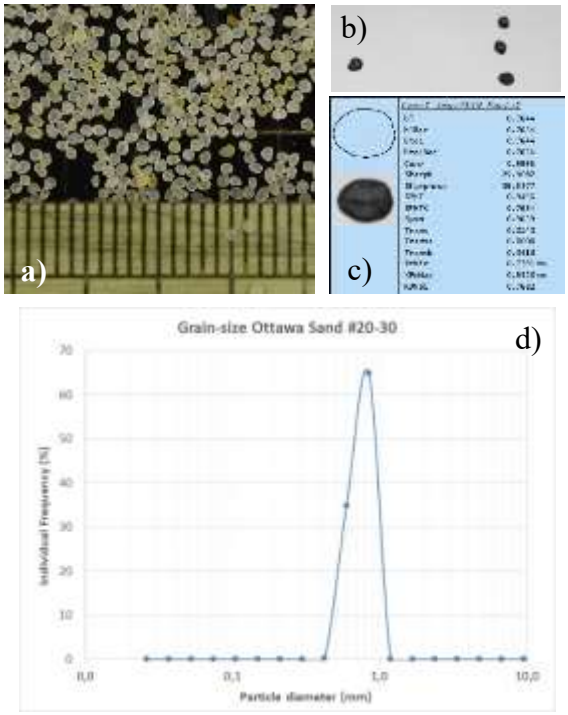


Fig. 3. a) Photo of Ottawa #20-30 sand; b) image of Ottawa sand#20-30 captured by Camsizer® P4 during the test; c) example of all relevant size and shape data for each particle; d) grain-size distribution.

Table. I. Statistical results of Ottawa sand #20-30 repeatability test.

	D10	D50	D90
Average (mm)	0.635	0.742	0.839
STDev	0.002	0.001	0.001
CV (%)	0.31	0.13	0.13

The results of the repeatability test permitted the characterization of the Ottawa sand #20-30. The grain-size distribution (Fig. 3) reveals a unimodal sand and the average of the main percentiles are: D10 = 0.635 mm, D50 = 0.742 mm, and D90 = 0.839 mm with coefficient of variation the 0.31%, 0.13% and 0.13%, respectively (Table I). These results shows a great repeatability of this equipment and technique.

Two CRMs (IA030 and IA035) were tested in order to evaluate the trueness. According to ISO 13322-2:2021, six tests of each CRMs were performed at the laboratory. The number of IA030 images ranged between 4168 and 18956 allowing the analysis of

27962 to 30917 (basic camera) and 3132 to 4222 (zoom camera) particles. For IA035, the number of images ranged between 11977 and 16608 and from 6721 to 7072 particles (basic camera) and 1763 to 2029 (zoom camera) were analysed. All the IA030 and IA035 grain-size distributions are represented in figures 4 and 5, respectively.

The results show a multimodal material (IA030) and a unimodal material (IA035) and, in both cases, the six tests demonstrated a high repeatability of the measurements.

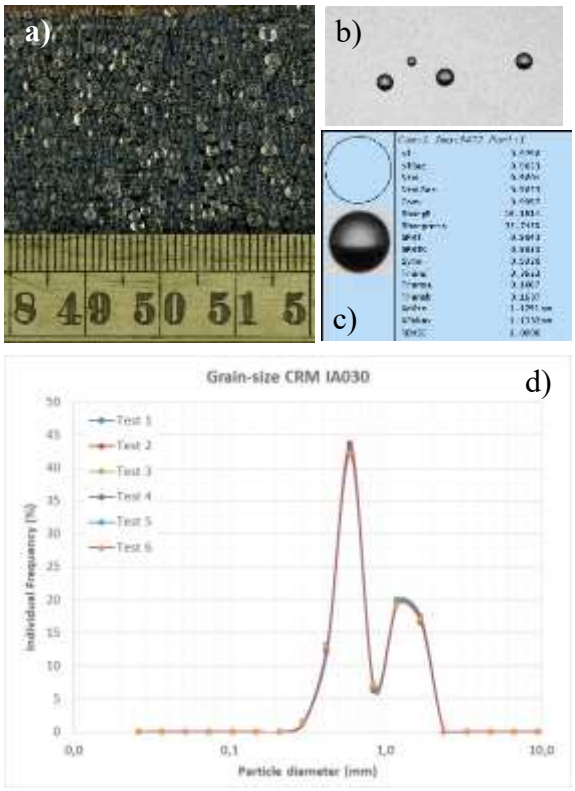


Fig. 4. a) Photo of CRM IA30; b) image of CRM IA30 captured by Camsizer during the test; c) example of all relevant size and shape data for each particle; d) grain-size distribution - IH Camsizer® P4.

The results obtained with the Camsizer® P4 analyser for both CRMs were correlated with the certified values with traceability to the National Institute of Standards and Technology (NIST). For this purpose were compare the percentiles 5, 10, 25, 50, 75, 90 and 95 for IA030 (Fig. 6) and the percentiles 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 and 99 for IA035 (Fig. 7). The relations exhibit very high predictability ($R^2 \geq 0.998$).

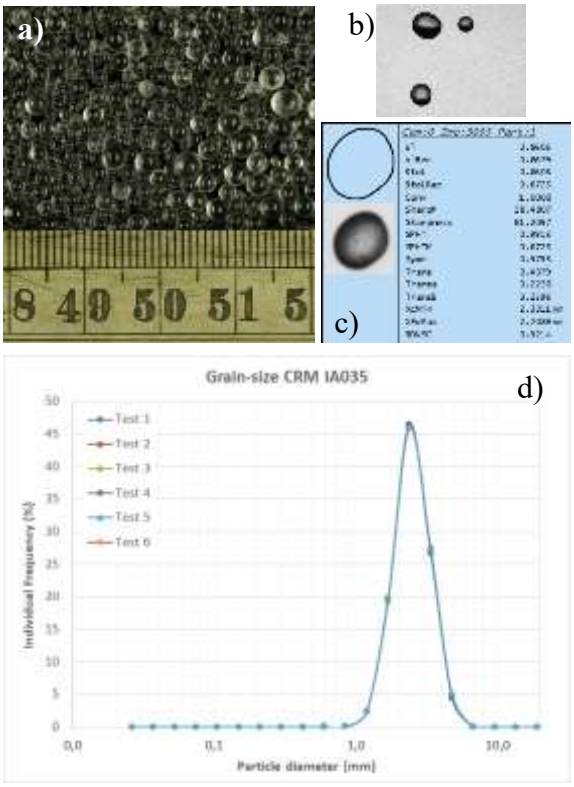


Fig. 5. a) Photo of CRM IA35; b) image of CRM IA35 captured by Camsizer during the test; c) example of all relevant size and shape data for each particle; d) grain-size distribution - IH Camsizer® P4.

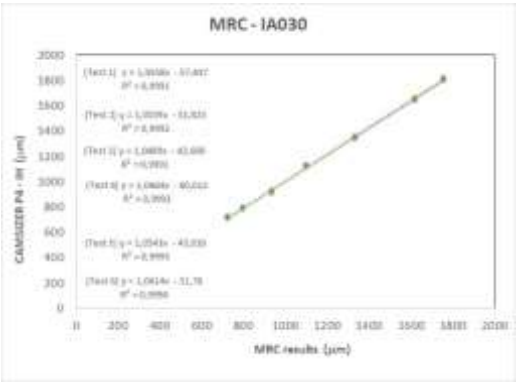


Fig. 6. Correlation between certified values and results measured with CamsizerP4 equipment.

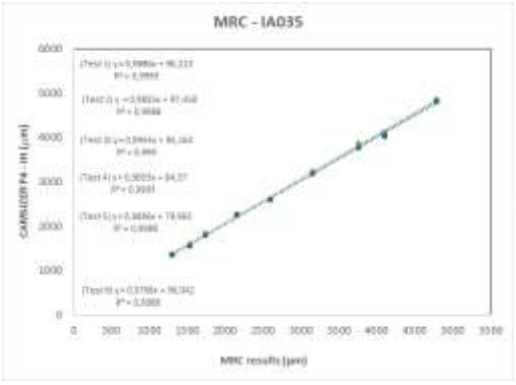


Fig. 7. Correlation between certified results and results measured with Camsizer® P4 equipment.

Relatively to particle shape, the analysis follow the methodology described in ISO 9276-6:2008. Values of aspect ratio (b/l), symmetry (Sym), convexity (CONV), roundness (RDN_{SC}), sphericity ($SPHT_K$) and others were calculated for all particles (Fig. 3, 4 and 5).

The relation between $SPHT_K$ and RDN_{SC} for the three tested materials are represented in figure 8. As expected, both CRMs are composed mainly by well rounded (>0.9) particles with high sphericity (>0.9). Sphericity values <0.9 means that the particles are not perfect spheres. On the other hand, the Ottawa sand is a natural river sand characterized by sub-rounded and rounded particles (0.5 to 0.9) with sphericity between 0.6 and 0.9.

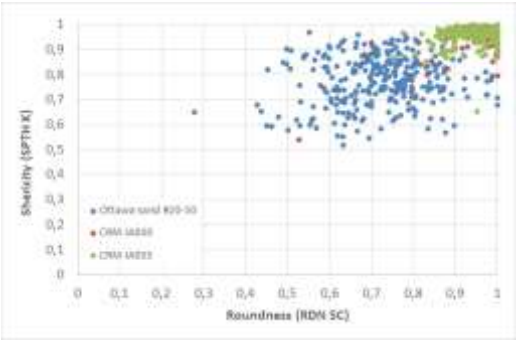


Fig. 8 – Relation between $SPTH_K$ and RDN_{SC} for the tested materials.

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The implementation of the DIA for grain-size analysis on unconsolidated materials, and its validation with NIST traceable certified reference materials showed that the method produces high accuracy results that are traceable to SI.

Moreover, the performance of the method allows the characterization of the particle size with greater accuracy, in association to the description of the particle shape.

This method will significantly increase the laboratory productivity, namely when compared with the sieving method and morphoscopic analysis.

REFERENCES

ASTM D2487-17:2020. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System*). ASTM.

Bandini, V., Biondi, G., Cascone, E., Di Filippo, G., 2017. Dynamic image analysis of Etna Sand in one-dimensional compression. *Measurement* 104, 336–346.

Ilić, M., Budak, I., Vasić, M.V., Nagode, A., Kozmidis-Luburić, U., Hodolić, J., Puškar, T., 2015. Size and shape particle analysis by applying image analysis and laser diffraction–Inhalable dust in a dental laboratory. *Measurement* 66, 109–117.

ISO 9276-6:2008. *Representation of Results of Particle Size Analysis - Part 6: Descriptive and Quantitative Representation of Particle Shape and Morphology.* International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 13322-2:2021. *Particle size analysis - Image analysis methods. Part 2: Dynamic image analysis methods*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 14488:2007(E). *Particulate materials - Sampling and sample splitting for the determination of particulate properties.* International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Li, L., Iskander, M., 2020. Evaluation of dynamic image analysis for characterizing granular soils. *Geotechnical Testing Journal*. 43 (5).

Mattheus, C.R., Diggins, T.P., Santoro, J.A. (2020). Issues with integrating carbonate sand texture data generated by different analytical approaches: A comparison of standard sieve and laser-diffraction methods. *Sedimentary Geology*. 401 (2020), 105635.

Microtrac Retsch, no date. *Correlation between sieve analysis and image analysis made easy.* Whitepaper 0718. www.microtrac.com

NP EN ISO/IEC 17025:2018. *Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e Calibração*. Instituto Português da Qualidade.

Shang, Y., Kaakinen, A., Beets, C.J., Prins, M.A., 2018. Aeolian silt transport processes as fingerprinted by dynamic image analysis of the grain-size and shape characteristics of Chinese loess and Red Clay deposits. *Sedimentary Geology.* 375, 36–48.

Suescun-Florez, E., Iskander, M., Bless, S., 2020. Evolution of particle damage of sand during axial compression via arrested tests. *Acta Geotechnica*. 15 (1), 95–112.

Ulusoy, U., Igathinathane, C., 2016. Particle size distribution modelling of milled coals by dynamic image analysis and mechanical sieving. *Fuel Processing Technology.* 143, 100–109.

Wang, X., Weng, Y., Wei, H., Meng, Q., Hu, M., 2019. Particle obstruction and crushing of dredged calcareous soil in the Nansha Islands, South China *Sea. Engineering Geology*. 261, 105274.

Wei, H., Zhao, T., Meng, Q., Wang, X., Zhang, B., 2020. Quantifying the Morphology of Calcareous Sands by Dynamic image Analysis. *International Journal Geomechanics.* 20 (4), 04020020.

Zhang, X., Baudet, B.A., Hu, W., Xu, Q., 2017. Characterization of the ultimate particle size distribution of uniform and gap-graded soils. *Soils and Foundations.* 57 (4), 603–618.

Textural analysis of sedimentary samples from different environmental sources: Comparison between standard sieve and dynamic image analysis methods

J. Pombo (1), A. Rodrigues(1)

(1) Instituto Hidrográfico. joaquim.pombo@hidrografico.pt

Abstract:

Textural analysis is a critical description in any study of sedimentary deposits characterisation. The standard sieve method for the grain-size of coarse particle has been used worldwide, for determining the size of unconsolidated sedimentary particles, despite the cost and time consuming. New methods such as dynamic image analysis (DIA), more productive and accurate, are a reality. In this work, a comparison between dynamic image analysis of particle size analysis and the classic sieving method is carried out, using samples from different sedimentary environments. Grain-size distributions obtained from the two methods shows a general good correlation. The correlation is better when siliciclastic sands are analysed and worse when the samples contain many irregular carbonate particles. DIA tends to overestimate coarse particles, especially when irregular particles are present.

Keywords: dynamic image analysis, grain size; particle size; particle shape; sieving.

1. INTRODUCTION

The sediment texture is an essential proxy in any sedimentological, geotechnical and many other studies regarding all sedimentary environments.

Over the years, there has been a significant improvement in grain-size analysis techniques. Also, there was an increase in the offer of new techniques and solutions that improve productivity, precision and accuracy in particle size measurement. At present, as there are several available grain-size methodologies, the integration in a single application of the results obtained with different analytical methods is still not recommended and there is always need to do a proper evaluation of those results (Mattheus *et al.*, 2020).

The standard sieving method is the most common method for deriving particle-size distributions of coarse particles with a diameter > 63 μm. However, the slowness of the tests and the poor repeatability and accuracy opened the path to the development of new methods.

Dynamic analysis image (DIA) is a recent method that converts the images of particles (with relative motion) into binary images, by separating each particle and measuring their dimensions individually. The method has many advantages: it requires a very small volume of sample (generally 30 to 100 g), the preparation is straight-forward, the processing time is very short (5 to 10 min.), measurements have high repeatability and accuracy and allow the analyse of particles with diameter range from 20 μm to 30 mm (coarse silt to very coarse gravel).

In this paper, we present the comparison of grain-size analysis performed with both standard sieving and dynamic analysis image methods, intending to assess possible issues in the textural data integration and their impacts on sediment classification. A brief comparison with previous sedimentological studies using different analytical approaches will be also presented.

2. METHODS AND MATERIAL

The standard sieve method implemented and accredited at Hydrographic Institute follows the NP EN 933-1:2014. Briefly, this technique consists in the introduction of an unconsolidated sediment/soil sample into the top of a vertical stack of sieves arranged by mesh size from largest to smallest (in 0.5 ϕ intervals). The stack is mechanical shaking continuously for 5 min, subsequent for more than 5 min with 10-sec stops. To ensure the correct separation of particles, all sieves were shaken by hand for at least 1 min. To calculate the grain-size distribution, the weight of the particles retrieved by each sieve will be used an integrated.

The dynamic analysis image method, performed with the Camsizer® P4 equipment follows the ISO 13322-2:2021. This methodology relies on a gravity system that disperses and generates a stream of particles into the measurement area. A precise dosage of particles is illuminated by a strong LED light source, where a camera system captures images of the projections of the particle shadows (Pombo *et al.*, 2022).

The individual and cumulative distribution employs a volume distribution and assumes that all particles are irregular. Moreover, the particle width ($X_{C\ min}$) is determined from the narrowest of all measured chords (Xc) determined, that are determined in each scanning direction (Fig. 1).

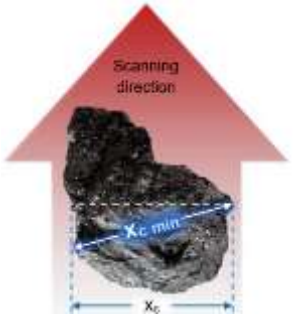


Fig. 1. Illustration of Xc min measurements, Microtrac Retsch (2020).

The Udden-Wentworth (1922) grain scale and Folk (1954) systematization were used to classify the textural parameters of the samples. The statistical parameters (mean, mode, sorting, skewness and kurtosis) were calculated logarithmically (phi scale) using the Method of Moments described by Krumbein and Pettijohn (1938). These parameters were calculated using the GRADISTAT software program, developed by Blott & Pye (2001).

Eight samples with a broad range of textures, shapes and mineral composition were analysed through both methods (Fig. 2).

Three carbonate samples (E73, E93 and E95) collected from the shelf of Porto Santo Island. Two-siliciclastic samples (A20 and A86) from the Portuguese continental shelf. One river sand (SP 4679) from the Tagus River, one from the insular shelf of S. Miguel Island – Azores archipelago (PV4) and more one river sand (Ottawa sand #20-30).

Table I, is a summary of the mass used in both methods, as well as, the number of images and particles analysed by DIA.

Table. I. Summary of the tests.

Sample name	Mass (g) Sieve / DIA	Camsizer® P4		
		Images captured	N.º particles analised	
			Basic cam	Zoom cam
E73	392,3	88 425	13 815 181	4 362 191
E93	379,3	93 046	10 664 017	2 973 807
E95	338,9	57 867	3 119 191	813 376
A20	437,5	59 810	2 157 645	335 431
A86	237,7	78 174	7 699 030	844 555
SP 4679	190	82 159	558 032	189 694
PV4	185,5	148 442	3 604 767	991 570
Ottawa sand	149,19	84 846	414 190	131 639

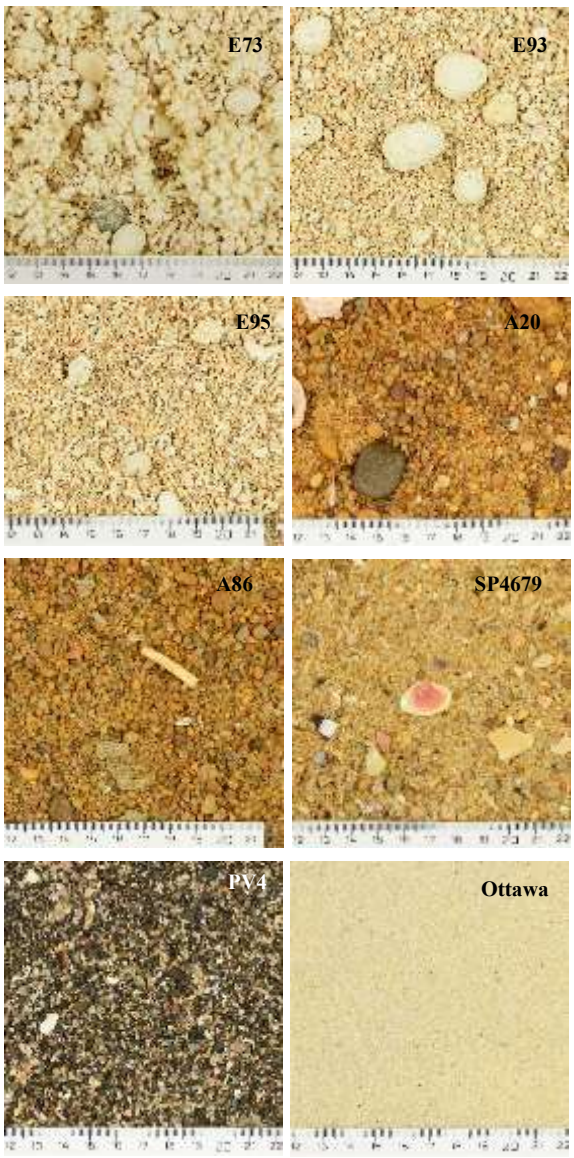


Fig. 2. Photos of the analysed samples.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The individual distribution curves and the statistical results of the particles analysis are presented in Fig. 3 and Table II, respectively.

Overall, it can be seen that there is a good correlation between the individual frequency curves performed by both methods (Fig. 2), except for samples SP 4679 and PV4, in which a lower percentage in the main class is observed in the DIA method relative to the sieving method.

The textural results show a difference in gravel and sand classes. The biggest deviation was observed in the sample SP4679, where the gravel fraction obtained from the sieving method was 12.2% while in the DIA method was 20.9% (Table II). This gap is reflected in the sand class and justifies the difference in the mode obtained by the two methodologies (0.25ϕ by sieving and -0.25ϕ by DIA).

Table. II. Summarizes the results of textural and statistical parameters of the samples analysed by both methods.

Sample	Method	% Gravel	% Sand	% Mud	Textural Group	Mean	Sorting	Skewness	Mode (ϕ)	Mean	Sorting	Skewness	D_{10} (ϕ)	D_{50} (ϕ)	D_{90} (ϕ)
E95	Sieve	46,7	53,3	0	Sandy Gravel	-0,86	1,13	0,21	-0,75	Very Coarse Sand	Poorly Sorted	Fine skewed	-2,27	-0,90	0,64
E95	DIA	51,3	48,7	0	Sandy Gravel	-1,00	1,15	0,43	-0,75	Very Coarse Sand	Poorly Sorted	Strongly fine skewed	-2,40	-1,04	0,44
E93	Sieve	46,4	53,6	0	Sandy Gravel	-1,06	1,57	-0,06	-0,75	Very Fine Gravel	Poorly Sorted	Near symmetrical	-3,64	-0,91	0,83
E93	DIA	50,3	49,7	0	Sandy Gravel	-1,13	1,63	0,21	-0,75	Very Fine Gravel	Poorly Sorted	Fine skewed	-3,67	-1,01	0,68
E73	Sieve	77,3	22,8	0	Sandy Gravel	-2,46	1,79	0,62	-4,75	Fine Gravel	Poorly Sorted	Strongly fine skewed	-4,64	-2,70	-0,10
E73	DIA	80,4	19,6	0	Gravel	-2,55	1,81	0,87	-4,75	Fine Gravel	Poorly Sorted	Strongly fine skewed	-4,67	-2,84	-0,27
A20	Sieve	42,5	57,5	0	Sandy Gravel	-0,80	1,18	-0,22	-1,25	Very Coarse Sand	Poorly Sorted	Coarse skewed	-2,31	-0,76	0,67
A20	DIA	45,5	54,5	0	Sandy Gravel	-0,86	1,23	-0,09	-1,25	Very Coarse Sand	Poorly Sorted	Near symmetrical	-2,38	-0,85	0,67
A86	Sieve	33,6	66,4	0	Sandy Gravel	-0,64	0,96	0,43	-0,25	Very Coarse Sand	Moderately Sorted	Strongly fine skewed	-1,87	-0,62	0,43
A86	DIA	35,8	64,2	0	Sandy Gravel	-0,65	1,02	0,64	-0,25	Very Coarse Sand	Poorly Sorted	Strongly fine skewed	-1,89	-0,67	0,44
SP4679	Sieve	12,2	87,8	0	Gravelly Sand	-0,22	0,74	-0,90	0,25	Very Coarse Sand	Moderately Sorted	Strongly coarse skewed	-1,19	-0,10	0,48
SP4679	DIA	20,9	79,2	0	Gravelly Sand	-0,48	1,00	-1,13	-0,25	Very Coarse Sand	Moderately Sorted	Strongly coarse skewed	-1,93	-0,25	0,45
PV4	Sieve	7,0	93,0	0	Gravelly Sand	0,54	1,03	-0,30	1,25	Coarse Sand	Poorly Sorted	Coarse skewed	-0,86	0,65	1,80
PV4	DIA	9,2	90,8	0	Gravelly Sand	0,48	1,08	-0,16	1,25	Coarse Sand	Poorly Sorted	Coarse skewed	-0,97	0,56	1,83
Ottawa	Sieve	0,0	100,0	0	Sand	0,48	0,25	0,17	0,25	Coarse Sand	Very Well Sorted	Fine skewed	0,09	0,16	0,89
Ottawa	DIA	0,0	100,0	0	Sand	0,42	0,24	0,09	0,25	Coarse Sand	Very Well Sorted	Strongly fine skewed	0,07	0,38	0,85

However, this difference does not affect the textural classification of this sample according to Folk (1954). Only the sample E73 shows a different classification (Table II).

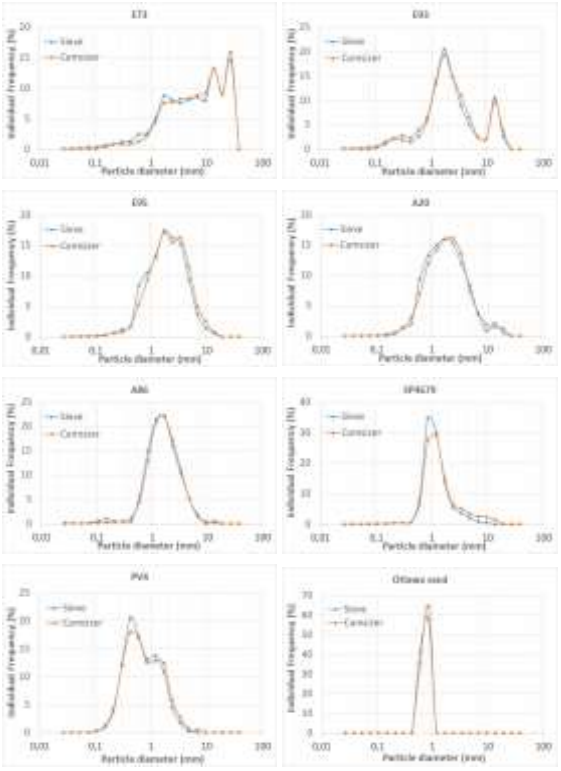


Fig. 3. Individual distribution curves of samples analysed by the two methods.

According to Folk and Ward (1954), the sample A86 show a different classification for sorting and the samples E95, E93, A20 and Ottawa sand shows a different classification for skewness (Table II).

For the remaining parameters, the differences between the two methods are not significant and do not imply different sediment classifications.

The correlation between the tests performed by the two methods corroborates the previous statements and shows a high correlation for most samples, R^2 >0.97. For the Ottawa sand the R^2 is 0.63 and reflects the distribution of the particles only in two size classes (Fig. 4).

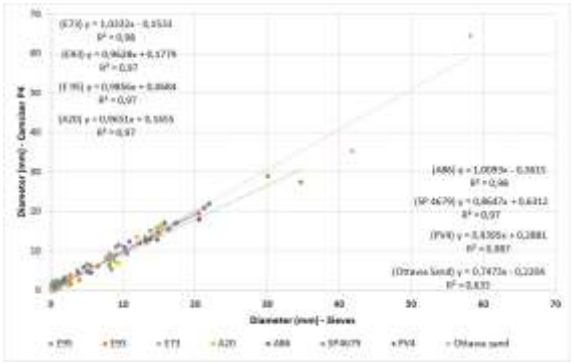


Fig. 4. Correlation between individual frequency of standard sieve method and results of DIA method.

To evaluate the influence of particle shape on the particle size results obtained by the two methods, we used the shape parameters measured by the DIA method, namely the roundness (Fig. 5). According to wadell (1932) and Krumbein (1941) it is the average curvature radius of all relevant corners divided by the largest inscribed circle radius.

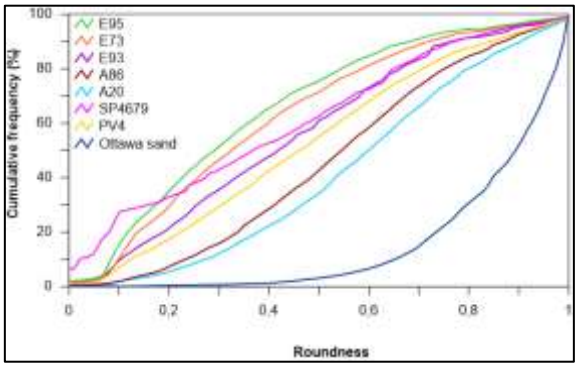


Fig. 5. Particle shape cumulative frequency of the roundness parameter.

From the analysis of the figure, it can be seen that the particles with a higher roundness index are those of the Ottawa sand sample, followed by the particles of samples A20 and A86, siliciclastic samples.

On the other hand, the particles from samples E95, E73 and E93 are those with, in general, lower roundness. This is due, in part, to highly irregular carbonate grain shapes.

Sample SP4679 is mostly composed of siliciclastic particles, however, the larger particles are very

angular mollusc fragments and only 10% of particles are well-rounded (> 0.8).

The sample PV4 is a mix of carbonate and terrigenous particles, the lower roundness of the particles is associated with the carbonate component and the low maturity of the volcanic terrigenous particles.

Comparing the textural with shape data, one can see that there is a greater difference between the two methods of grain-size analysis when the larger particles are very angular, as in sample SP4679, A20 and E73.

Carbonate sands (E73, E93 and E95) are often more texturally heterogeneous and contain an abundance of highly irregular particle shapes than siliciclastic sands (A20, A86, SP4679 and Ottawa sand), as described by Mattheus *et al.* (2020) and Flemming & Thum (1978).

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

For evaluating the performance of standard sieving and DIA in the grain-size analysis, eight natural sediment samples, having a broad range of grain-sizes, were analysed.

Grain-size distributions obtained from the standard sieving and the DIA shows a general good correlation. The correlation is better when siliciclastic sands are analysed and worse when the samples contain many irregular carbonate particles, namely in the larger size classes.

DIA tends to overestimate coarse particles, especially when irregular carbonate grains particles are present in the samples. In these cases, results are different and have an impact on statistic parameters (mode, sorting and skewness).

Additional work is needed to more systematically address the comparison between these two methodologies, namely, for other kinds of sedimentary deposits, mainly where carbonate particles are dominant and very angular (roundness < 0.5).

REFERENCES

Blott, S.J., Pye, K., (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and* Landforms. 26, 1237–1248.

Folk, R.L. and Ward, W.C. (1957). Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.

Folk, R.L. (1954). The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. *Journal of Geology,* 62, 344-359.

Flemming, B.W., Thum, A.B., 1978. The settling tube - a hydraulic method for grain size analysis of sands. *Kieler Meeresforschungen Sonderheft* 4, 82–95.

Ilić, M., Budak, I., Vasić, M.V., Nagode, A., Kozmidis-Luburić, U., Hodolić, J., Puškar, T., 2015. Size and shape particle analysis by applying image analysis and laser diffraction–Inhalable dust in a dental laboratory. *Measurement* 66, 109–117.

ISO 13322-2:2021 - *Particle size analysis - Image analysis methods. Part 2: Dynamic image analysis methods.* International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Mattheus, C.R., Diggins, T.P., Santoro, J.A. (2020). Issues with integrating carbonate sand texture data generated by different analytical approaches: A comparison of standard sieve and laser-diffraction methods. *Sedimentary Geology*. 401 (2020), 105635.

Microtrac Retsch (2020). Dimensions software Camsizer P4 manual. 18.12.2020 v0000.

NP EN 933-1:2014. *Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método da peneiração*. Instituto Português da Qualidade.

Pombo, J. and Rodrigues, A. (2022). Grain-size analysis by a dynamic image analyzer. *7as Jornadas de Engenharia Hidrográfica / 2as Jornadas Luso-Espanholas de Hidrografia.* Lisboa. Portugal.

Krumbein, W.C. and Pettijohn, F.J. (1938). *Manual of Sedimentary Petrography*. Appleton-Century-Crofts, New York.

Krumbein, W.C. (1941). Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles, J Sediment. Petrol. 11 (2) (1941) 64–72, doi:10.1306/D42690F3-2B26-11D7-8648000102C1865D.

Udden, J.A. (1914). Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America*, 25, 655-744.

Ulusoy, U., Igathinathane, C., 2016. Particle size distribution modelling of milled coals by dynamic image analysis and mechanical sieving. *Fuel Processing Technology.* 143, 100–109.

Wadell, H.A. (1932) Volume, Shape and Roundness of Rock Particles. The Journal of Geology, 40, 443-451. http://dx.doi.org/10.1086/623964.

Wentworth, C.K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, 377-392.

Machine Learning Aplicado ao Mapeamento Marinho: Caso de Estudo na Costa Oeste da Ilha da Madeira

D. Silva (1), L. Reis (2)

(1) RJ/Brasil. diogoceddia@id.uff.br.

(2) Divisão de Geologia Marinha. Instituto Hidrográfico. laura.reis@hidrografico.pt.

Resumo: O mapeamento marinho é, desde os primórdios da navegação, componente estratégica de diversos povos que utilizam os oceanos para seus objetivos. Com o avanço tecnológico, o rigor e performance das metodologias empregues para tais fins cresceram exponencialmente até ao presente, tendo-se tornado comum o recurso a computadores e algoritmos de inteligência artificial. Esse trabalho explora uma metodologia de mapeamento marinho usando aprendizado de máquina (Machine Learning), aplicada à predição do afloramento rochoso junto à costa oeste da Ilha da Madeira, com dados obtidos no âmbito do projeto SEDMAR Madeira. A proposta é alcançada em diversas etapas: (1) tratamento dos dados, (2) aplicação e configuração do modelo, e (3) análise de coerência geológica. Para além dos resultados alcançados, este trabalho permite disponibilizar mais uma ferramenta de auxílio para melhorar o mapeamento dos fundos marinhos: uma superfície do alvo, criada a partir de correlações estatísticas complexas e pormenorizadas, trabalhadas à excelência das ferramentas computacionais disponíveis.

Palavras-chave: cartografia geológica**,** inteligência artificial**,** machine learning, mapeamento Marinho, modelagem.

1. INTRODUÇÃO

O mapeamento marinho sempre foi de interesse de todos os povos com vínculo ao mar. Da vara de prumar até aos sistemas batimétricos multifeixe, mapas do fundo marinho foram progressivamente desenvolvidos e aperfeiçoados (OHI, 2005). Nesse âmbito, hoje, com o desenvolvimento computacional, técnicas de inteligência artificial podem ser desenvolvidas e testadas em ambiente doméstico, propiciando avanços tecnológicos sem precedentes.

A proposta desse trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento marinho utilizando o modelo de *machine learning* XGBoost. O alvo a ser mapeado é uma zona de afloramentos rochosos, do setor oeste da Ilha da Madeira, e os dados utilizados são batimetria multifeixe e sísmica monocanal de alta resolução (*sub-bottom profiler*). A batimetria corresponde a uma superfície de profundidades, abrangendo toda área de estudo. A sísmica, por sua vez, corresponde a dados dispostos em linhas de navegação – ou seja, uma distribuição geoespacial limitada. No entanto, é justamente a informação sísmica a referência principal para discernir a ocorrência ou não do afloramento rochoso. Nesse contexto, a aplicação do modelo de *machine learning* possibilita a extrapolação da caracterização do afloramento nas linhas sísmicas para toda extensão da superfície batimétrica.

Os resultados serão avaliados segundo a sua coerência geológica, em que serão exploradas as vantagens, desvantagens e particularidades dos produtos finais, tendo em conta as caraterísticas da área de estudo, o tipo de informação disponível e a sua cobertura geoespacial.

2. ÁREA DE ESTUDO

Foi selecionada a costa oeste da ilha da Madeira como área de estudo, uma vez que é particularmente complexa. Este setor da plataforma apresenta um relevo irregular, alternando entre afloramentos rochosos e espessuras sedimentares que podem atingir os 70 metros.

Todos os dados foram obtidos no âmbito do programa SEDMAR Madeira, em diversas campanhas a bordo do NRP Almirante Gago Coutinho, entre 2013 e 2018. Os dados batimétricos foram obtidos com os sistemas Kongsberg EM120 e EM710, e os dados de sísmica de alta resolução foram obtidos com os sistemas Echoes 3500 da Ixblue e Boomer AA200 da Applied Acoustics (Figura 1).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A modelagem utilizando algoritmos de inteligência artificial, incluindo modelos de *machine learning*, e possuem diversas etapas fundamentais. Nesse trabalho, o seguinte fluxograma foi abordado: construção dos datasets; aplicação e configuração do modelo; e análise de coerência geológica, presente em todas as etapas deste trabalho para guiar a melhoria de performance do modelo.

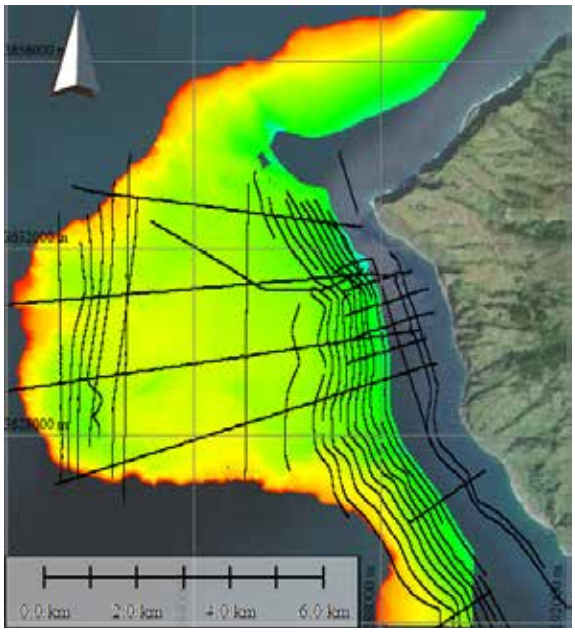


Fig. 1. Área de estudo – batimetria, no formato de superfície; e sísmica, representada em linhas pretas. WGS84 / UTM 28N.

3.1. Construção dos Datasets

O processo de construção dos datasets é a etapa que reúne, processa, filtra e condiciona os dados para serem inseridos no modelo desejado. Aqui, o objetivo é fornecer o melhor input possível para o modelo escolhido, com o máximo de informação relevante acerca do alvo de predição, mantendo qualidade, formato e condicionamento adequados (Huang *et al.*, 2015).

Para modelar o afloramento rochoso a oeste da Ilha da Madeira, foram dispostos dados do sondador multifeixe (SMF) e da sísmica monocanal de alta resolução. A partir do SMF foram extraídos dados de medições de profundidade, *backscatter*, declividade do fundo e orientação da declividade do fundo (quatro camadas de informação ou *features*). Para aumentar a complexidade do modelo e a qualidade da predição, foi adotada a estratégia de *feature engeneering*. Ela consiste na criação de mais *features* para alimentar o modelo, nomeadamente: a distância de um dado ponto coordenado para a linha de costa e a distância de um dado ponto coordenado para o talude. Já a sísmica foi previamente classificada entre rocha e sedimento. Entretanto, durante a classificação e como consequência da resolução dos equipamentos envolvidos, toda a espessura sedimentar da superfície do fundo marinho menor que 20 centímetros foi considerada afloramento rochoso. Dessa forma, o *dataset* é constituído de 6 *features* e um alvo (*target*), sendo ele rocha ou sedimento. Todas as *features* são sujeitas à etapa de filtragem, a qual valores discrepantes que não representam a grandeza física são eliminados.

As 6 camadas de informação (ou *features*) correspondem a *datasets* distintos. O objetivo final é ter somente um *dataset*, que contemple um ponto coordenado e seus respectivos atributos (profundidade, intensidade do *backscatter* etc.). Para tal, estabelecemos um ponto coordenado como *pivot* e buscamos seus vizinhos mais próximos das outras *features*. Para busca do vizinho mais próximo foi utilizada uma árvore de busca binária *k-d-tree*, que devido à sua complexidade de algoritmo possui crescimento linear em função do *dataset* e, portanto, apresenta custo computacional baixo (Bentley, 1975). Com os vizinhos mais próximos calculados, um novo *dataset* é construído, o qual associa um ponto coordenado a um valor de cada *feature*. Com o *dataset* montado, aplica-se um filtro de natureza geoespacial, que descarta qualquer relação entre as *features*, se a distância do vizinho mais próximo for superior a 10 metros. Para isso, foi utilizada a distância euclidiana.

Ao todo, são necessários dois *datasets* para esse trabalho: um para realizar a modelagem (*dataset 1*); e outro para extrapolação (*dataset 2*). O *dataset 1* contém as informações de classe (sedimento/rocha), necessárias para treinar o modelo e calcular métricas de assertividade. É sob o *dataset 1* que são feitas etapas de teste, configuração e ajuste do modelo. O *dataset 2*, por sua vez, corresponde a toda superfície das *features* que não inclui pontos coordenados com informação de classe – portanto, sem informação de validação. O *dataset 2* corresponde à superfície sobre a qual as classes serão extrapoladas/preditas.

3.2. Aplicação e configuração do modelo

Para o presente trabalho, foi aplicado o modelo de *machine learning* XGBoost. Essa escolha foi motivada pelo fato de o XGBoost ser considerado um algoritmo "estado-da-arte", tendo vencido diversos desafios no kaggle[1] e em competições[2] (Ariza-Garzon *et al*., 2020; Chen and Guestrin, 2016; Li *et al*., 2020). Como o *target* é uma classe (sedimento ou rocha), a abordagem desenvolvida consiste em uma modelagem supervisionada classificatória.

Os modelos foram submetidos a etapas de configuração: *tuning*, análise de *overfit* e filtro estatístico.

O *tuning* consiste em configurar valores para os hiperparâmetros do modelo que maximizem a sua métrica de assertividade (Zhang & Zhan; 2017). Foi utilizado *cross-validadion*[3] com 5 *folds* para calcular a acurácia balanceada[4], e o modelo foi

[1] www.kaggle.com/c/datachallenge (em 2015 o XGBoost esteve em 17 das 29 soluções vencedoras)
[2] KDDCup 2015 (XGBoost esteve na solução das 10 equipes vencedoras)
[3] https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.model_selection.StratifiedKFold.html
[4] https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.balanced_accuracy_score.html

hiperparametrizado iterativamente[5] até alcançar o melhor conjunto de parâmetros que maximizasse a métrica de desempenho.

A análise de *overfit*[6] consiste em determinar se o modelo consegue abstrair os dados de treinamento para além do domínio treinado. Um modelo em *overfit* é 'viciado' no *dataset* de treinamento, apresenta métricas de desempenho boas e é incapaz de realizar predições coerentes, já que só consegue predizer um universo restrito de *inputs* e não generaliza bem (Wang *et al.*, 2020).

O filtro estatístico foi utilizado com finalidade de 'limpar' falsos positivos do afloramento rochoso. Esse filtro baseou-se na eliminação de qualquer predição da classe rocha que tivesse menos de 90% de probabilidade no output do modelo[7].

3.3. Análise de coerência geológica

Normalmente, os modelos de IA otimizam funções que aumentam métricas de desempenho. Nesta análise é preciso ter em conta que nem sempre os valores de desempenho matematicamente superiores traduzem a maior coerência geológica. Portanto, durante todas as etapas de ajuste do modelo foi analisado como os hiperparâmetros e filtros impactavam a superfície final, tendo em vista o melhor *output* .

4. RESULTADOS

O modelo, de treinamento/validação (*dataset 1*) preliminar sem *tuning*, apresentou acurácia balanceada[8] de 98.9%. Com *tuning*, sua performance subiu para 99.5%, registrando uma melhora de 0.6%. Foi analisado também que o modelo não caiu em *overfit*.

Através do recurso de batimetria com sombra, nota-se que as rochas se expressam majoritariamente como uma rugosidade de fundo. Isso permite a avaliação da performance do modelo, conforme há consistência de coincidência da predição com a rugosidade do fundo. Sob esse aspecto visual, algumas regiões da superfície predita foram analisadas individualmente. Foram elas: uma região com grande densidade e continuidade de registros/linhas sísmicas (Figura 2); e outra com poucos registros sísmicos (Figura 3). Entretanto, como a interpretação sísmica classificou como afloramento rochoso espessuras sedimentares de até 20 centímetros, o modelo classificou como rocha alguns fundos sem rugosidade.

5. CONCLUSÃO

O modelo XGBoost conseguiu alcançar uma métrica de acurácia balanceada muito satisfatória (99.5% com *cross-validation* de 5 *folds*), sem *overfit* e com devida hiperparametrização. Para extrapolação, o modelo

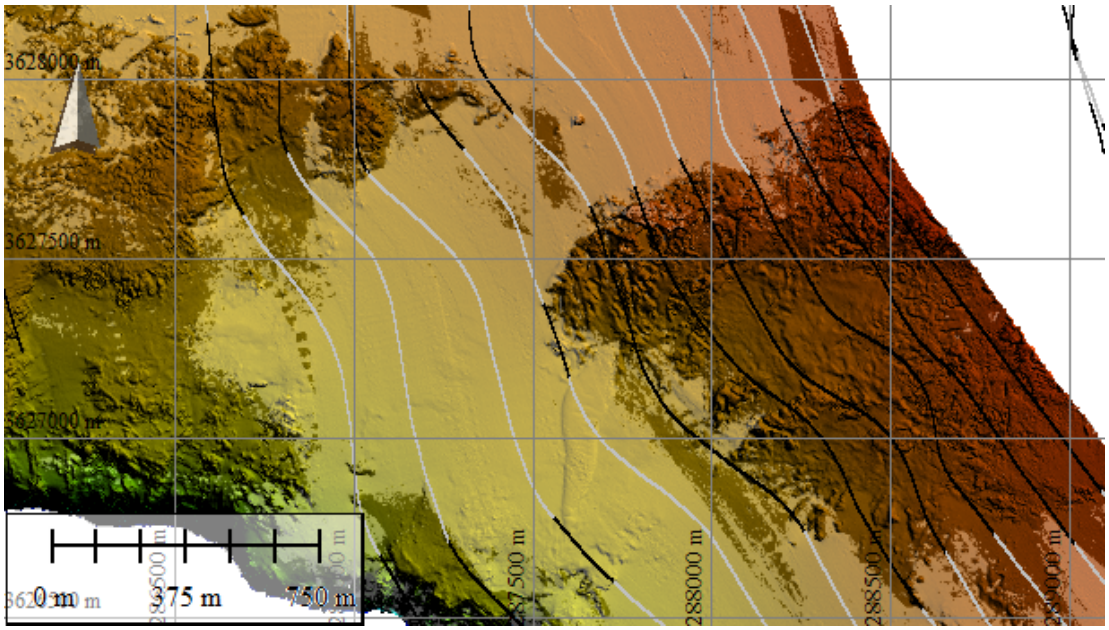


Fig. 2. Detecção do afloramento rochoso através de modelo XGBoost. As linhas correspondem à sismica, classificadas em rocha (cor preta) e sedimento (cor cinza). Ao fundo, superfície batimétrica com sombra, evidenciando rugosidade de fundo. Regiões mais escuras correspondem à predição do modelo do afloramento. Região com alta densidade e continuidade de linhas sísmicas. WGS84 / UTM 28N.

[5] https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.model_selection.GridSearchCV.html

[6] https://xgboost.readthedocs.io/en/latest/python/python_api.html

[7] https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/prediction.html

[8] https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.balanced_accuracy_score.html

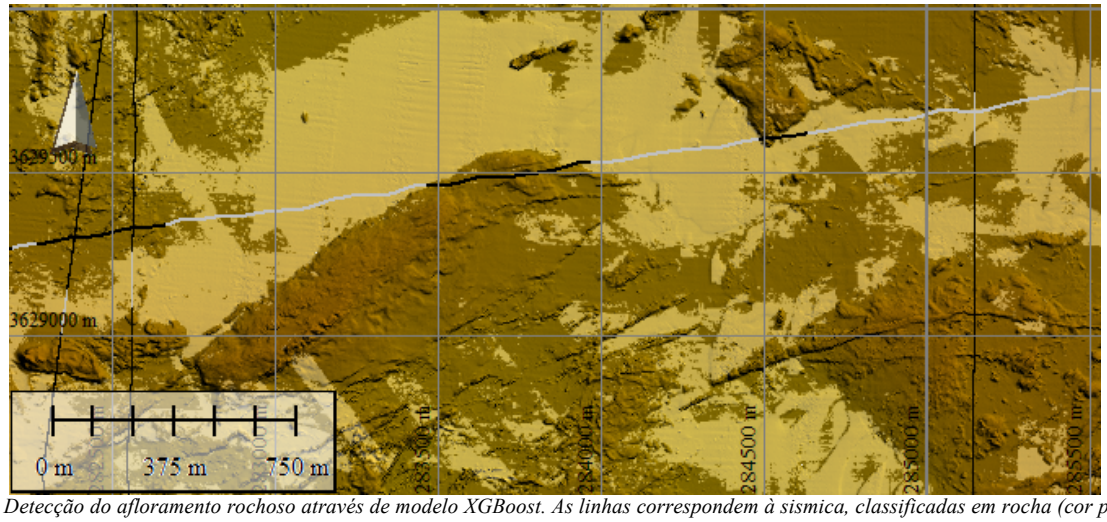


Fig. 3. Detecção do afloramento rochoso através de modelo XGBoost. As linhas correspondem à sismica, classificadas em rocha (cor preta) e sedimento (cor cinza). Ao fundo, superfície batimétrica com sombra, evidenciando rugosidade de fundo. Regiões mais escuras correspondem à predição do modelo do afloramento. Região com baixa densidade e continuidade de linhas sísmicas. WGS84 / UTM 28N.

apresentou grande coerência geológica de uma forma geral na área de estudo, quando comparada com a rugosidade do fundo da batimetria com sombra e interpretação sísmica (indicadores de afloramento rochoso). Dessa forma, a metodologia mostrou ser uma ferramenta promissora e eficiente para a abordagem.

No entanto, a área de estudo não apresenta uma homogeneidade na distribuição das linhas sísmicas. Isso possui dois impactos negativos no modelo: primeiro, o modelo adquire um viés, pois é treinado mais em uma subárea do que em outras; e segundo, que regiões com poucas linhas sísmicas ocasionam em perda de coerência geológica, pois o modelo não consegue predizer bem aquilo que não conheceu na etapa de treinamento. Para que o modelo obtenha o melhor resultado possível, as linhas sísmicas devem estar igualmente distribuídas em toda área de estudo, de forma que explique o máximo da heterogeneidade e complexidade da área. Tal resultado seria alcançado se, durante a aquisição da batimetria multifeixe, dados de sísmica monocanal de alta resolução fossem adquiridos concomitantemente.

Além disso, a superfície do afloramento rochoso feito pelo modelo pode ser exportado em formato ASCII, com pontos coordenados. Dessa forma, pela ótica do especialista que necessita mapear o afloramento, o modelo pode servir ou de referência ou de base para delimitar a fronteira sedimento/afloramento rochoso. Assim, diminui-se significativamente o tempo de trabalho de mapeamento, alcançando maior eficiência e produtividade.

Por último e como maior contribuição deste trabalho sugere-se que, com uma boa metodologia e com dados bem distribuídos geoespacialmente, o modelo de *machine learning* possa ser utilizado para realizar cartografia sedimentar ou outros mapeamentos expeditos.

Agradecimentos

Este trabalho é uma contribuição para o programa SEDMAR (Mapeamento dos Fundos Marinhos) em execução no Instituto Hidrográfico, sob coordenação de Aurora Rodrigues.

REFERÊNCIAS

Ariza-Garzon, M.J., Arroyo, J., Caparrini, A., Segovia-Vargas, M.J., 2020. Explainability of a Machine Learning Granting Scoring Model in Peer-to-Peer Lending. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984412.

Bentley, J.L., 1975. Multidimensional Binary Search Trees Used for Associative Searching. Commun. ACM 18, 509–517.

Chen, T., Guestrin, C., 2016. XGBoost: A scalable tree boosting system. https://doi.org/10.1145/2939672.2939785.

Jianglin Huang, Yan-Fu Li, Min Xie, (2015). An empirical analysis of data preprocessing for machine learning-based software cost estimation. Information and Software Technology. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2015.07.004.

Zhang L., Zhan C. (2017). Machine Learning in Rock Facies Classification: An Application of XGBoost. https://doi.org/10.1190/IGC2017-351.

Li, X., Luo, J., Jin, X., He, Q., Niu, Y., 2020. Improving soil thickness estimations based on multiple environmental variables with stacking ensemble methods. Remote Sensing 12, 1–21. https://doi.org/10.3390/rs12213609.

Wang M., Huang D., Wang G., Li D. (2020). SS-XGBoost: A Machine Learning Framework for Predicting Newmark Sliding Displacements of Slopes. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Volume 146. https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002297.

The importance of bottom trawling as a process affecting sedimentation patterns in the Portuguese shelf and upper continental slopes

A. Campos (1,2), V. Henriques (1,2), M. Cachão (3,4), P. Fonseca (1), T. Drago (1,4)

(1) IPMA, Instituto Português do Mar e Atmosfera, Av. Alfredo Magalhães Ramalho, 6 1495-165 Algés

(2) CCMAR, Centre of Marine Sciences, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro

(3) FCUL, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, Edifício C6, 1749-016 Lisboa

(4) IDL, Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, Edifício C1, 1749-016 Lisboa

Abstract: Off the Portuguese continental coast, bottom trawling has been systematically practiced from the mid-sixties. At present, the area of activity starts at the 6-mile line from the coastline throughout the continental shelf and the slope, until about 1500 metres depth. The physical impact of trawl components on the seafloor sediments leads to disruption of the sedimentary upper layers, affecting benthic habitats and disrupting of the Upper Holocene paleoceanographic archives, namely those recording recent Climate Changes. Assessment of the magnitude of fishing impacts requires the identification of reference zones that may act as controls. Mapping of the spatial distribution of trawling intensity based on the georeferenced information of vessel's activity constitutes a way to identify future areas for protection and conservation of the sedimentological and paleoceanographic archives.

Key words: paleoceanographic archives, trawling intensity, sedimentation integrity.

INTRODUCTION

The study of sedimentation patterns at different sites in the Atlantic and the Mediterranean, including canyons and abyssal plains, suggests that sediment transfer and accumulation trends may have changed during the last decades, differing from secular trends (Martín *et al*., 2008; Palanques *et al*., 2014). This change has been associated to trawling activities and is attributed to the rapid expansion of the trawl fleets during the 1960's. At present, trawling is one of the main processes impacting the marine environment both in terms of their benthic communities as well as their sedimentary archives of recent past paleoceanographic changes.

Some studies have been carried out addressing the evaluation of trawling disturbance in benthos and sediment composition, while studies on long-term effects of sediment resuspension and deposition are lacking. Attempts to quantify the resuspension and redistribution of sediments caused by commercial trawling have been mainly localized in estuarine and coastal environments and the continental shelf, deeper domains remaining understudied.

Off the Portuguese continental coast, bottom trawling has been systematically practiced from the mid-sixties. In 2005, a total of 102 coastal trawlers were identified; by the end of 2016 the number of vessels had been reduced to 79 units.

Nowadays, trawling occurs in an area parallel to the coast, extending from six miles away to the shoreline, below which trawlers are interdicted to operate (Decreto Regulamentar 43/87), to depths up to 1500 meters. This activity impacts all the continental shelf, along with a significant portion of the upper continental slope, in which deep-sea crustaceans are targeted.

The typology of the fishing gears used and the way in which they operate rely on the direct contact of some of its components with the seabed, originating sediment clouds. In particular, the trawl doors and footropes have a direct physical impact on the seafloor sediments. These factors may lead to plumes by sediment resuspension, disturbance of sedimentary structures such as ripples, production of erosional ridges and furrows and homogenization of topographic complexities.

From a biological point of view these effects lead to disappearance of the biogenic substrates, with significant impact on benthic communities, including damage to sessile organisms, resulting in habitats fragmentation. In a study on the impact of trawling in the Algarve coast, Morais *et al.* (2007) detected, in addition to disturbances in the sediment roughness, absence of sessile organisms in trawled areas. Fonseca *et al*. (2013) collected images in fishing grounds at about 400 m depth, off the plateau of Faro. In these images (Figure 1) some of the impacts resulting from the use of trawls are visible, namely marks on the sediment left by the passage of the trawl doors.



Fig. 1. Intensely towed area with doors marks (in Fonseca et al., 2013).

The magnitude of the perturbations induced to the sediments is related to the fleet's technical characteristics, in particular the engine power, taken as a proxy for the gear size and subsequent ability to disturb and resuspend the sediment. However, a better indicator of bottom disturbance is currently provided by the satellite-based information of vessel's activity through VMS fleet records. This information is available for all Portuguese fishing vessels with more than 15 m length, which is the case of the coastal trawlers operating off the Portuguese coast.

TRAWLING ACTIVITY ALONG THE PORTUGUESE CONTINENTAL SHELF AND UPPER SLOPE

The extension of seabed impacted by coastal trawlers is shown in Figure 2, based on VMS fishing records from the period 2005-2016, applying a selection based on a speed rule. The fleet operated along the entire Portuguese continental coast (36º to 42ºN and 7º to 9ºW, ICES divisions IXa), in a fringe parallel to the coast, from six miles away to the shoreline to depths of approximately 1500 meters. This activity covered the entire continental geological shelf, extending to vast areas of the continental slope, avoiding the areas where the shelf is cut by various topographical features, including submarine canyons (Nazaré, Setúbal, Sagres) and trenches (Álvaro Cabral), which constitute a physical constraint for the trawling activity. Other constraints are related to the existence of patches of rough bottoms and rocky outcrops, steep slopes and areas inside the six nautical miles. Variation in trawling intensity is shown in Figure 3, with higher intensity off Aveiro, Figueira da Foz and Sines, in the west coast, and along the entire south coast.

In Figure 4 the trawling activity is mapped, collated with bathymetry and sediment distribution. It can be observed that, during the study period, all the considered sediment classes were impacted, although with different intensities, as shown in Figure 3.



Fig. 2. Trawling activity along the Portuguese continental coast based on VMS fishing records of the trawl fleet in the period 2005-2016.

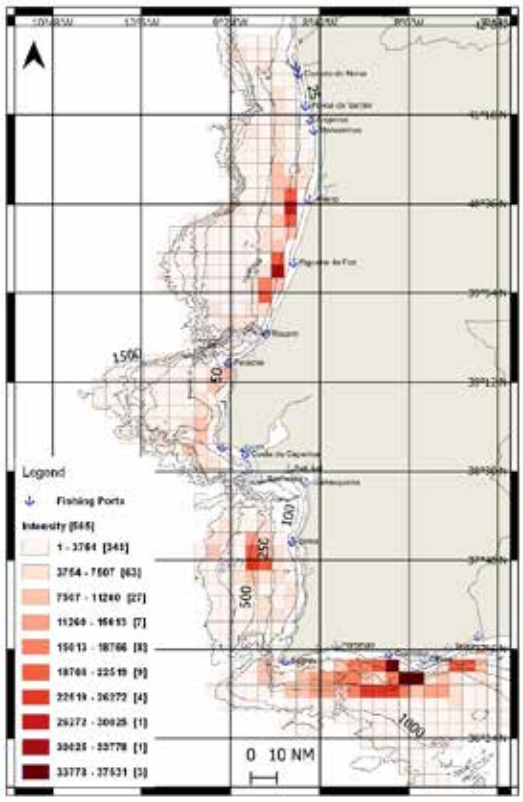


Fig. 3. Map of trawling intensity along the Portuguese continental coast based on the number of VMS fishing registers in each cell, for the period 2005-2016. A 0.1º grid was adopted.

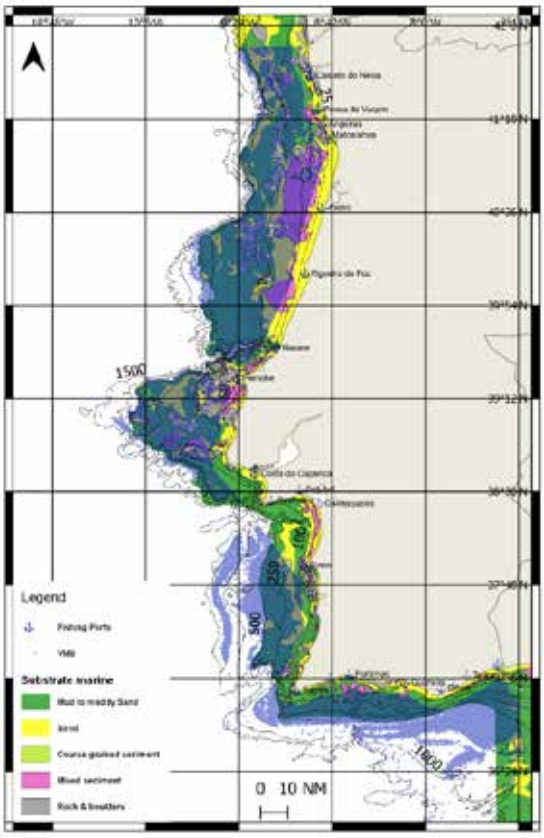


Fig. 4. Bathymetric and sediment chart (source: EMODNET) with superimposed trawling activity distribution (blue areas).

From a geological point of view, areas with rock outcrops are the least impacted, with more extensively rocky surfaces being avoided by trawlers. Areas where sedimentation is dominant are all impacted from coarse sediments to silty-clay muds.

Coarse sediments are mainly impacted through physical structures and mixture of the upper layers. Finer sands and muddy sediments are additionally disturbed by the turbid plume that trawl generates. This plume will resediment and thus alter the sedimentological and paleontological signal of the paleoceanographic and climatic proxies in a much wider area. The impacted area will depend not only on the intensity of the trawling itself, but also on the existence of bottom currents and the bottom slope. It is expected that for activities occurring in the upper continental slope, its impact may generate continuous turbidity currents that may impact the entire slope and the base of the abyssal plains.

CONCLUDING REMARKS

The study of the long-term effects induced by trawling activity in marine sediments may be very challenging due the difficulty in finding unaffected areas that could be used as control for comparative studies. Submarine canyons, small spots that are not exploited due to their morphological characteristics, or areas in the vicinity of steep slopes are exceptions. However, they are likely to be indirectly affected, since the resuspension caused by towing can affect vast surrounding areas. Martín *et al*. (2008) using sediment cores extracted from a submarine canyon at around 200 m depth, detected changes in sediment accumulation rates that have been directly related to the trawling activity. The choice of reference zones that may serve as controls for monitoring trawling impact on sedimentation patterns will require detailed mapping of fishing intensity, as well as monitoring studies involving the record of bottom sediment resuspension and transport measurement according to the speed and direction of the bottom currents.

From a geological point of view, the identification of areas subjected to lesser trawling activities may be important to define and propose, in the future, areas of protection of the sedimentological archives.

Acknowledgements
This study has been carried out within the scope of the project TECPESCAS. Georeferenced data on the fishing activity was made available by the Directorate General for Natural Resources, Safety and Maritime Services. The support of Luís Sousa with mapping is gratefully acknowledged.

REFERENCES

Decreto Regulamentar 43/87. Diário da República n.º 162/1987, Série I de 1987-07-17.

Fonseca, P., Abrantes, F., Aguilar, R., Campos, A., Cunha, M., Ferreira, D., Pilar-Fonseca, T., Garcia, S., Henriques, V., Machado, M., Mechó, A., Relvas, P., Rodrigues, C.F., Salgueiro, E., Vieira, R., Weetman, A., Castro, M., 2013. A deep-water crinoid Leptometra celtica bed off the Portuguese south coast. Marine Biodiversity. DOI:10.1007/s12526-013-0191-2.

Martín, J , Puig, P. , Palanques, A., Masqué, P., García-Orellana, J. (2008). Effect of commercial trawling on the deep sedimentation in a Mediterranean submarine canyon. Marine Geology, 252, 150–155.

Morais, P., Borges, T.C., Carnall, C., Terrinha, P., Cooper, C., Cooper, R. (2007). Trawl induced bottom disturbances off the south coast of Portugal: direct observations by the 'Delta' manned-submarine on the submarine canyon of Portimão. Marine Ecology, 28,112–222.

Palanques, A., Puig, P., Guillén, J., Demestre, M., Martín, J. (2014). Effects of bottom trawling on the Ebro continental shelf sedimentary system (NW Mediterranean). Continental Shelf Research, 72, 83–98.

Geochemical and textural characterisation of surface sediments of the Professor Luiz Saldanha Natural Park and surrounding area: Preliminary Results

M. Mil-Homens (1,2), A. Veronez (3), Y. Nahoara (4), V. Magalhães (1), P. Brito (1,2), J. Lobo-Arteaga (1,5)

(1) Instituto Português do Mar e da Atmosfera I.P., Rua Alfredo Magalhães Ramalho 6, 1495-006, Lisboa, Portugal. Email: mario.milhomens@ipma.pt
(2) Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental, Terminal de Cruzeiros de Leixões. Av. General Norton de Matos s/n 4450-208 Matosinhos, Portugal
(3) CFE – Centre for Functional Ecology, Universidade de Coimbra, Calçada Martim de Freitas, 3000-456 Coimbra, Portugal
(4) EPED – Escola Profissional de Educação para o Desenvolvimento, Largo Bulhão Pato 56, 2825-114 Caparica, Portugal
(5) MARE— Centro de Ciências do Mar e do Ambiente, Universidade Nova de Lisboa, Campus de Caparica, 2829-516, Caparica, Portugal.

Abstract: The marine park Professor Luiz Saldanha, established in 1998, and surrounding area are part of the Arrábida Park, which is a nature reserve implemented to protect and help recovering the biodiversity. To characterise and to evaluate the overall environmental status of the region, the oceanographic campaign MarBIS2020 was performed in September 2020. Using a holistic approach, samples were taken for the characterisation of the grain-size distribution, the geochemical composition (major and trace elements) and organic matter content, nutrients, meio and macrobenthic fauna, toxins and the abundances of microplastics geochemical and grain-size characterisation of the area. To reach that goal a set of 31 surface sediment samples were analysed. This study was focused on the geochemical and textural characterisation of the surface sediments and the relationship between parameters, contributing to the MarBIS and CSS projects.

Keywords: continental shelf, geochemical characterization, grain-size distribution marine sediments.

1. INTRODUCTION

Sediments are an essential part of marine environments due to provide environmental conditions for the development and conservation of marine organisms. They can also act as a sink or a source for environmental contaminants (e.g., trace elements and organic pollutants (Windom et al., 1989)).

The Professor Luiz Saldanha Marine Park (PLSMP) is a marine protected area created in 1998. This marine protected area and surrounding area are part of the Natural Reserve named Arrábida Park. It was designed to protect and recover the biodiversity of this special marine area, by promoting conservation actions and managing the different human activities practiced in these waters. The assessment of trace element concentrations in sediments represent an important tool for evaluating the environmental quality and helping decision-makers in the definition of management strategies. Therefore, in this study we investigated the grain-size composition, the total organic matter content, the major (Al, Si, Ca and Fe) and trace elements (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn) in surface samples of this region to provide more information on trace element contamination. Thus, this study aims to fulfil the following objectives: (1) To characterize grain-size composition and organic matter content, (2) characterize geochemical composition and (3) evaluate the spatial distribution of trace elements in surface sediments of this area.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Sediment Sampling

Thirty-one surface sediment samples were collected along the Professor Luiz Saldanha Natural Park and surrounding area (Fig. 1) during the oceanographic campaign MarBIS2020 (September 2020) using a Smith-McIntyre grab. The location of the samples was attempted to cover the area under study.

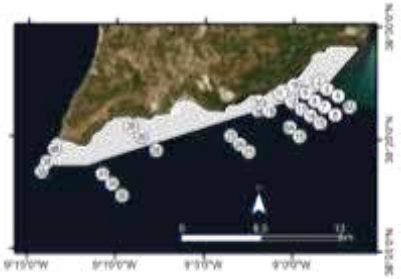


Fig. 1. Sediment sampling stations of the MarBIS2020 cruise. Grey area represents the limits of the Professor Luiz Saldanha Natural Park (PLSMP).

Before proceeding to laboratory analyses, all sub-samples were freeze-dried and the fraction lower than 2 mm was ground, except the sub-sample for grain-size analysis. After grounding, samples were transferred to labelled plastic vials until required for analysis. They were then sieved through a 2 mm square mesh sieve and the lower fraction was milled using agate pots in a Fritsch Pulverisette 7 Classic Line planetary mill.

2.2. Grain-size analysis

Sub-samples for grain-size analysis were dried at 100ºC. Approximately 100g of dried material was sieved using an analytical sieve shaker (Retsch S200) with a set of sixteen stainless-steel sieves (from 38µm to 8mm). In this study was considered only three sediment fractions (gravel (> 2mm), sand (63µm to 2 mm) and fine fraction (< 63µm)).

2.3. Total organic matter determinations

The total organic matter (TOM) was determined by loss on ignition at 450°C of 200 mg of sediment sample in the fraction lower than 2mm during approximately 2 h in a muffle furnace. Results are expressed as the percentage of total organic matter in each sample.

2.4. Geochemical determinations

Major elements and trace elements (excluding Hg) were measured by a Perkin-Elmer ICP-MS (NexION 2000C) after a total decomposition of 100 mg of powdered sample by microwave digestion with a mixture of Aqua Regia and hydrofluoric acid. The quality control was based on the analysis of certified reference materials (MAG-1, marine mud prepared by USGS), reagent blanks and duplicate samples (c.a. 10% of the studied samples). In general, the reagent blanks accounted for less than 1% of the elemental content in the samples. Analytical results show good agreement with the certified values for all elements studied (recovery value varies between 85 and 110%). Analytical precision was assessed by analysis of 4 samples prepared in duplicate and analysed at random positions using the Relative Percent Difference (RPD). The RPD was within 10% for the studied elements.

The total content of Hg in the sediment samples (average amount of 15 mg) was quantified using thermal pyrolysis atomic absorption analysis (LECO 254 Advanced Mercury Analyser). This technique implies the pyrolysis of the sample in a combustion tube at 750°C under an oxygen atmosphere, collection on a gold amalgamator and subsequent detection by atomic absorption spectrometry (AAS) using a silicon UV diode detector (Costley et al., 2000). Quality assurance was assessed using the reference materials (RM) QTM-134MS and QTM-135MS (QUASIMEME) analysed under the same conditions as the samples, procedural blanks, and sample duplicates. The obtained results indicate recoveries around 112% (n = 3 for each RM used). Precision for Hg expressed as relative standard deviation (RSD) for a level of significance of 95% of 3 replicate samples of both RM was lower than 10%.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Grain-size composition and total organic matter contents

The sediments are mainly composed of sand (median content of 72%) with low contents of gravel and fine fraction (ff) (both with median contents of 7%) (Fig. 2a).

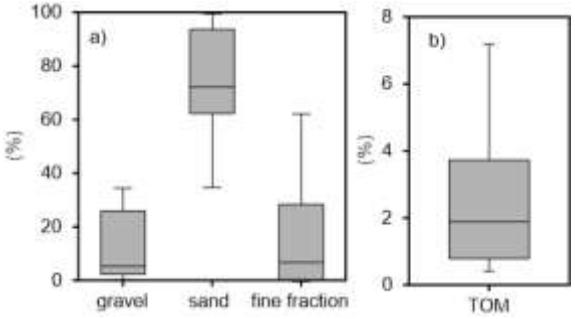


Fig. 2. Box-and-whisker plots representing the a) grain-size composition and b) total organic matter content of the surface sediments studied. The plot shows the minimum, maximum, median, and lower and upper quartiles. The box represents the interquartile range that contains 50% of the values. The whiskers are the lines that extend from the box to the highest and lowest values. The line across the box indicates the median.

The surface samples from the PLSMP are in general dominated by sand excepting sample 29 with 64% of fine fraction. Surface samples outside of the PLSMP are also marked by high contents of sand, excepting samples 23, 24 and 34, dominated by gravel and fine fraction, respectively (Fig. 3). Eleven surface samples contain more than 20% of gravel.

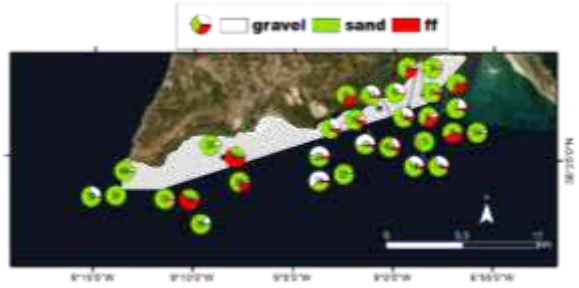


Fig. 3. Pie-charts reflecting the grain-size composition of the surface sediments in percentage.

The TOM content varies between 0.41% and 7.18%, with a median content of 3.34% (Fig. 2b). The lowest values of TOM are observed in the three samples located close to the Espichel Cape. Samples containing the high contents of TOM does not reveal a specific distribution pattern (Fig. 3).

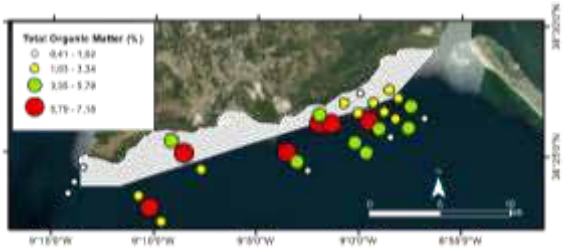


Fig. 4. Spatial distribution of Total Organic Matter (%) in the studied surface sediments.

3.2 *Major element compositiion*

Silicon (Si) is the most abundant major element followed by Ca, Al, Fe and Mg (Fig.4).

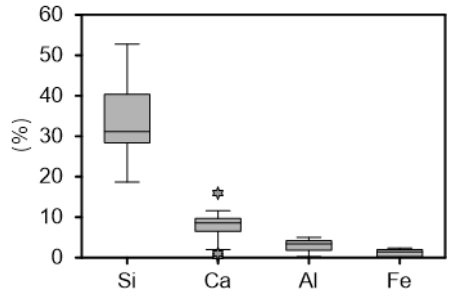


Fig. 5. Box-and-whisker plots representing the major element contents of the studied surface sediments. Outliers (defined as 1.5 X inter-quartile range) are represented by grey star symbol.

Silicon is inversely correlated with Ca (Spearman correlation r=-0.53, p<0.05) (proxy for biogenic debris) and Al (Spearman correlation r=-0.71, p<0.05) (proxy for detrital materials excluding quartz).

Aluminium is positively correlated with Fe (Spearman correlation r=-0.86, p<0.05) and TOM (Spearman correlation r=-0.86, p<0.05). This points to the deposition with fine-grained particles (clay minerals, and organic matter particles) and in the case of Fe may suggests the absence of early diagenetic changes. Considering the relation between Al and fine fraction, this was significantly high (r^2=0.82) if a set of six surface samples (4, 6, 8, 9, 11 and 34) characterized by high fine-fraction contents (> 25%) are excluded (see Fig. 6). The majority of these are in the vicinity of the Sado mouth estuary.

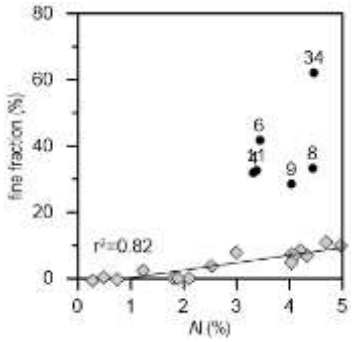


Fig. 6. Scatter plots showing relationships between fine fraction and Al.

3.3 *Trace element concentrations*

Trace elements (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, V and Zn) are positively correlated with Al (0.64< Spearman correlation < 0.90, p<0.05), suggesting a close association with fine-grained particles, and are positively correlated among them, suggesting the importance of mixing processes occurring both inside of the Sado estuary (e.g., wind and tidal regime) and during the transfer and deposition at coastal areas.

3.4 *Trace element concentrations vs trace element/Al ratios*

Trace element concentrations were normalised to Al to compensate the grain-size variability. Aluminium was chosen as the normalising element due to its presence in the lattice of fine-grained aluminosilicate trace-metal-bearing minerals (fine-grained aluminosilicate minerals), and because it is not substantially influenced by anthropogenic inputs (Windom et al., 1989). In general, the high non-normalised trace element concentrations are interpreted to be largely related to the fine fraction. The relatively high Al-normalised values identified in some locations are probably associated with trace element enrichments may be explained by the closeness to the Sado dredge disposal sites for Class 3 (slightly contaminated dredged material) of the Portuguese Regulatory Legislation 1450/2007 (dashed areas in Fig. 7a and b). Nevertheless, the total trace element concentrations are in general lower than the Class 1 concentrations suggesting dilution with marine uncontaminated materials.

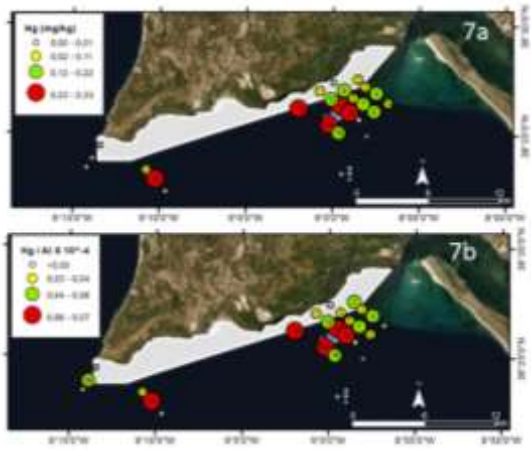


Fig. 7. Spatial distribution of a) Hg concentrations and b) Hg normalised to Al in the studied surface sediments. The reason why some samples are not represented in fig 6b is due to the lack of Al concentrations yet.

4. CONCLUSIONS

This study assessed the spatial distribution of grain size, total organic matter, and major and trace elements in surface sediment samples of the PLSMP

The identification of relative high trace element Al normalised values in the vicinities of the Sado dredge disposal sites suggests the dispersion of these through

the area. Studies of meio and macrobenthic fauna are in development to evaluate if these species are influenced by this dredge disposal sediments.

Future works to be developed in this dataset will involve the development of regional geochemical baseline (RGB) models. These models will be obtained from the relationship between each trace element and a proxy for grain size (e.g., Al, Fe) allowing the definition of the slope, the intercepts, and the 95 % prediction limits for each elemental RGB. and surrounding area collected in September 2020. These can be used by other researchers in future monitoring programs for evaluating the environmental quality of the marine sediments in the PLSMP and surrounding area.

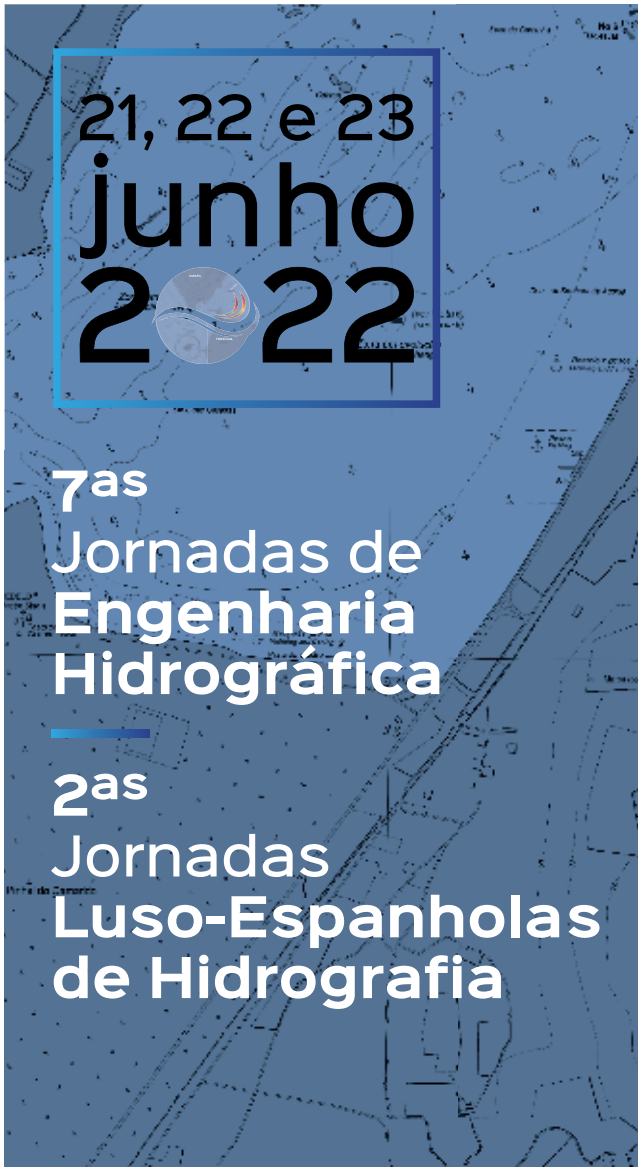
Acknowledgements
This study was supported by the Fundo Europeu dos Assuntos Marítimos e das Pescas (FEAMP) through the CSS project (MAR- 01.04.02-FEAMP-0013) and by the Portuguese Government under the Marine Biodiversity Information System – MarBIS, and by the Marine and Environmental Sciences Centre (MARE) which is financed by national funds from FCT/MCTES (UIDB/04292/2020).

REFERENCES

Costley, C. T., Mossop, K. F., Dean, J. R., Garden, L. M., Marshall, J., & Carroll, J. (2000). Determination of mercury in environmental and biological samples using pyrolysis atomic absorption spectrometry with gold amalgamation. *Analytica Chimica Acta*, *405*(1–2), 179–183. https://doi.org/10.1016/S0003-2670(99)00742-4

Windom, H. L., Schropp, S. J., Calder, F. D., Ryan, J. D., Smith, R. G., Burney, L. C., … Rawlinson, C. H. (1989). Natural Trace Metal Concentrations in Estuarine and Coastal Marine Sediments of the Southeastern United States. *Environmental Science and Technology*, *23*(3), 314–320. https://doi.org/10.1021/es00180a008

QUÍMICA E POLUIÇÃO DO MEIO MARINHO



Anthropogenic gadolinium as an emergent contaminant in the Tagus estuary

P. Brito (1,2), M. Caetano (1,2), M. Mil-Homens (1,2)

(1) Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), Avenida Dr. Alfredo Magalhães Ramalho, 6, 1495-006 Lisboa, Portugal. Email: pbrito@ipma.pt.

(2) Interdisciplinary Centre of Marine and Environmental Research (CIIMAR), Avenida General Norton de Matos S/N, 4450-208 Matosinhos, Portugal.

Abstract: In the last decades, there has been an exponential increase in rare earth elements demand associated with the development of new technologies and their wide use in various applications. Studies report an anthropogenic enrichment of gadolinium (Gd) in rivers and estuaries around the world due to the use of Gd-based contrast agents in complementary medical diagnoses (such as magnetic resonance imaging), already referred to as a potential emerging contaminant. Little is known about the toxicity, fate and stability of these compounds under natural conditions, compromising the assessment of risk to the environment and human health. To date, studies are scarce to quantify the Gd released into the environment, unlike conventional metals (such as mercury or lead), controlled by national and/or international laws and regulations. This work presents the first evidence of Gd positive anomaly in the effluents of a Lisbon Metropolitan Area wastewater treatment plant and in the Tagus estuary.

Keywords: emergent contaminants, gadolinium, rare earth elements, Tagus estuary.

1. INTRODUCTION

In recent decades, there has been an exponential increase in the demand for rare earth elements (REE) associated with the development of new technologies and the increasing use of these metals in the most diverse applications (Nassar et al., 2015).

Several studies have reported enrichment of REE gadolinium (Gd) in rivers, lakes and estuaries around the world, due to the use of Gd-based contrast agents (Gd-CA) in complementary diagnostic imaging tests, such as magnetic resonance imaging (MRI), being already referred to as an emerging environmental contaminant (Brito, 2019).

The use of Gd-CA has grown exponentially since the late 20th century, with the number of MRI increasing by 50% since 2005 (Ebrahimi & Barbieri, 2019), with countries with more developed health care systems becoming verified the highest numbers of tests performed (OECD, 2021). These numbers could be even higher if we consider that in the last two years (2020-2021) Gd-CA has also been used to detect heart damage caused by SARS-COV-2 infections, during the global COVID-19 pandemic (Huang et al., 2020).

Although these compounds have been identified in the environment for over 20 years (Bau & Dulski, 1996), and also in drinking water in several European cities (Kulaksiz & Bau, 2011; Tepe et al., 2014), its toxicity, fate, and stability under natural conditions is still poorly known, compromising the assessment of risk in the environment, but also to human health.

As the metals released by anthropogenic activities are generally found in more soluble and bioavailable forms than naturally occurring ones (Perrat et al., 2017), it is urgent to characterise the Tagus estuary in terms of concentrations of this metal. Thus, it is extremely important to quantify Gd concentrations, evaluating not only the natural and anthropogenic contributions of this metal but also the main sources to the estuary and potential anomalies, as well as the transfer to the adjacent coastal zone.

To date, there are not enough studies to quantify the Gd released into the environment, unlike the so-called conventional metals (such as mercury or lead), which are controlled by national and/or international legislation and regulations (e.g. Water Framework Directive, 2000). However, based on the predicted growth in the use of Gd (Dutta et al., 2016), the probability of a significant increase in the quantities released into the environment is quite large, with particular emphasis on large urban areas.

Information on this element in the Tagus estuary is still scarce (Brito et al., 2019), particularly concerning the dissolved fraction, and known data on Gd concentrations and respective flows in this estuarine system (Caetano et al., 2019) do not allow for a deeper and more detailed analysis to draw up management plans and regulate the aquatic environment.

This study presents the first evidence of high anthropogenic Gd concentrations in treated urban wastewater and in the Tagus estuary.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Sampling

Water samples were collected as part of the REEUse project, between 2016 and 2017, in the final effluent of Alcântara Wastewater Treatment Plant (WWTP) and at two points in the Tagus estuary, Alcântara (ALC), near the Alcântara WWTP outfall and in front of Vila Franca de Xira (VFX) and recently (April 2022) in the final effluent of Beirolas WWTP and Portinho da Costa (PRC) (Fig.1).

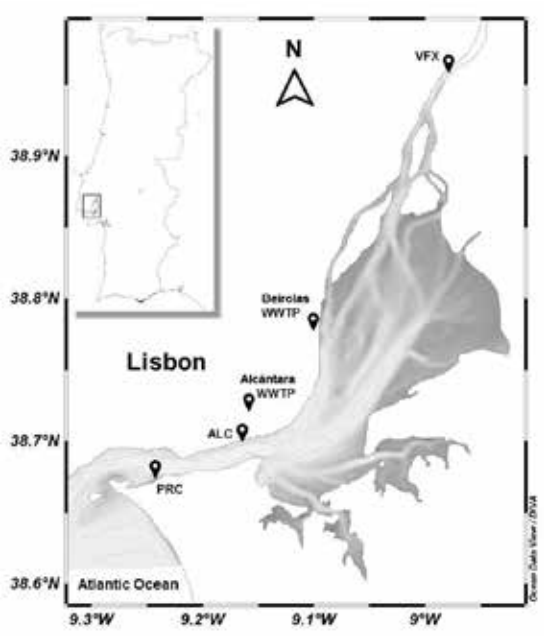


Fig. 1. Sample location in the Tagus estuary.

Water sampling in the WWTP was carried out using a previously decontaminated plastic bottle collector and at the estuary's sampling sites a Niskin bottle was used. All water samples were refrigerated until reached the laboratory, filtered through 0.45 µm polyethersulfone (PES) membrane filters and preserved with HNO_3 (pH < 2) until further elemental analysis.

2.2. Elemental analysis

WWTP water samples were analysed directly, and estuarine water samples were diluted 10-fold with ultra-pure water (18.2 MΩ.cm) before ICP-MS analysis.

For the study of Gd positive anomalies (enrichment), all REE were quantified to detect eventual fractionations of one or a group of elements. Therefore, Gd and the rest of the Lanthanides (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb and Lu) were determined using a Perkin-Elmer ICP-MS (NexION 2000C), equipped with a cyclonic spray chamber, a concentric Meinhard nebulizer and a dual detector. A 6-point calibration curve was used to quantify each element, using a commercial indium solution (^{115}In) as an internal standard (Alfa Aesar, Plasma Standard Solution, Specpure®).

Reagent blanks, random sample duplicates, and NASS-7 and CASS-6 certified reference materials (CRM), from the National Research Council of Canada, were processed in the same way and analysed as an analytical quality control procedure to assess the accuracy and precision. Reagent blanks always accounted for less than 1% of the total metal content in the samples and CV duplicates were ≤ 10%. The REE concentrations in the CRM were not statistically different from the certified values (*t-student*; α = 0.05).

Conventionally, REE concentrations are plotted in normalised abundance against a standard rock. In this study, Post-Archaean Australian Shale (PAAS) was used because the abundance of REE is well known (McLennan, 1989) and its composition fits the average composition of the Earth's upper crust. The result obtained is a smooth curve of normalised REE abundance (REE_{PAAS}), with the anomalous behaviour of individual elements expressed by the ratio of measured and interpolated abundances, both normalised, according to equation (1).

$$Gd/Gd^* = Gd_{PAAS}/(0.33 \times Sm_{PAAS} + 0.67 \times Tb_{PAAS}) \quad (1)$$

In the case of Gd, the interpolation is performed between the elements samarium (Sm) and terbium (Tb), since europium (Eu) is often anomalous as well.

The calculation of anthropogenic ($Gd_{Anthrop}$) and geogenic ($Gd_{Geogenic}$) Gd concentrations was performed according to equations (2) and (3), respectively (Möller et al., 2002).

$$Gd_{Anthop} = Gd_{measured} - Gd_{Geogenic} \quad (2)$$

$$Gd_{Geogenic} = (0.33 \times Sm_{PAAS} + 0.67 \times Tb_{PAAS}) \times Gd_{PAAS} \quad (3)$$

3. RESULTS AND DISCUSSION

The REE concentrations, Gd anomalies (Gd/Gd*), anthropogenic ($Gd_{Anthrop}$) and geogenic ($Gd_{Geogenic}$) Gd concentrations in all the water samples collected are reported in Table I, while the PAAS-normalised REE distribution patterns are given in Figure 2.

Gadolinium concentrations and anomalies are within range of previously reported values (e.g. Bau et al., 2006; Bau & Dulski, 1996; Kümmerer & Helmers, 2000; Lawrence et al., 2006; Möller et al., 2002; Rabiet et al., 2009; Song et al., 2017). The highest Gd concentrations and anomalies were observed in the water samples collected at the final treatment effluents in both WWTP (Table I and Fig. 2).

Tab. i. Compilation of REE concentrations (ng L^{-1}), Gd anomalies (Gd/Gd), anthropogenic ($Gd_{Anthrop}$) and geogenic ($Gd_{Geogenic}$) Gd concentrations (ng L^{-1}), in the water samples collected.*

	VFX	ALC	Alcântara WWTP	Beirolas WWTP	PRC
La	7.46	78.9	11.1	8.81	12.2
Ce	12.3	151	21.5	21.1	19.5
Pr	1.64	17.7	2.02	3.98	3.76
Nd	7.05	74.0	8.88	11.7	13.25
Sm	2.86	16.6	1.63	4.12	2.82
Eu	1.88	4.37	1.63	1.51	0.687
Gd	10.6	90.9	682	207	2.58
Tb	0.247	2.6	0.175	0.449	0.374
Dy	1.62	18.2	1.41	3.04	2.33
Ho	0.380	4.85	0.354	0.750	0.586
Er	1.56	9.26	1.87	2.04	1.48
Tm	0.274	1.46	0.189	0.449	0.322
Yb	2.41	9.55	3.06	3.80	1.40
Lu	0.549	1.68	0.540	0.426	0.308
(Gd/Gd*)	5.9	6.0	589	70.3	1.1
$Gd_{Anthrop}$	8.8	75.8	681	204	0.294
$Gd_{Geogenic}$	1.8	15.1	1.2	3.0	2.3

The Gd concentrations were 207 and 682 ng L^{-1} and the anomalies were 70.3 and 589, for the Beirolas and Alcântara WWTP, respectively. These results show a clear presence of anthropogenic Gd in the dissolved fraction, which originates from Gd-CA released into the urban wastewater treatment systems.

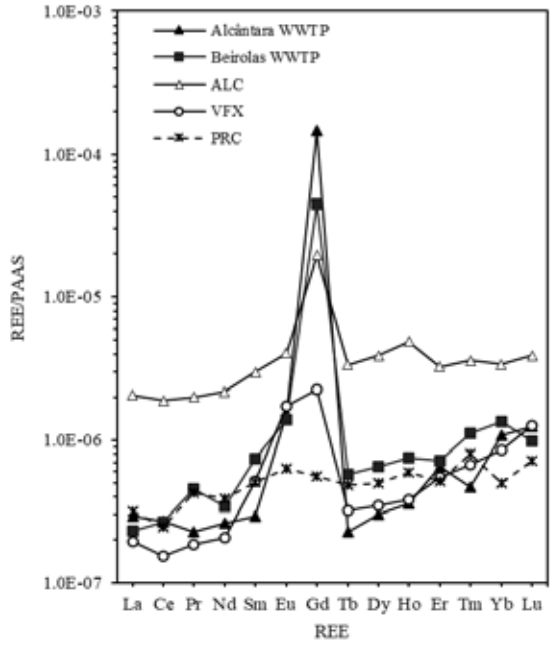


Fig. 2. PAAS-normalised REE distribution patterns of samples taken from the Alcântara and Beirolas WWTPs, the two estuarine sampling sites Alcântara (ALC) and Vila Franca de Xira (VFX), and Portinho da Costa (PRC).

These values contrast with those of the water samples collected in the estuary, which revealed lower Gd concentrations (2.58 - 90.9 ng L^{-1}) and also lower anomalies (1.1 - 6.0). It should be noted that ALC and VFX sites still showed high Gd concentrations, evidenced in the calculated anomalies (Gd/Gd* > 1.5), denouncing a clear anthropogenic contribution, confirmed by the $Gd_{Anthrop}$ and $Gd_{Geogenic}$ concentrations. This still noticeable high values are explained by the fact that ALC site is located just in front of the Alcântara WWTP outfall, while VFX site is located between the discharge points of two other WWTP, Vila Franca de Xira (upstream) and Alverca (downstream).

The PRC site, although close to Portinho da Costa WWTP outfall, does not showed a comparable anthropogenic Gd contribution (Gd/Gd* = 1.1; $Gd_{Anthrop}$ = 0.294 ng L^{-1}; $Gd_{Geogenic}$ = 2.3 ng L^{-1}). These much lower values could be explained by the strong ebb current observed during the PRC sampling, together with the distance from the collection point (at the beach) to the WWTP outfall and respective discharged plume.

4. CONCLUSIONS

This preliminary study shows a clear anthropogenic Gd presence in the WWTP effluents and in the Tagus estuary. The highest values were observed, as expected, in the WWTP effluents final step and at the outfall. However, significant values were still detected in the upper estuary, evidencing a wide distribution and potential impact of this emerging contaminant along the estuary.

Considering that a greater increase in Gd-CA release is expected in the near future and that data on the distribution and levels of anthropogenic Gd in this estuary are still scarce, it is urgent to define a wider monitoring study to develop a deeper understanding and detailed analysis on the impact of this emerging contaminant.

Future data may provide useful management tools to elaborate future plans to reduce the impact on the aquatic environment, and contribute with information to improve necessary national or international legislation and regulations.

Acknowledgements

This work was financially supported by the Portuguese Science and Technology Foundation through the REEUSE Project (FCT/PTDC/QEQ-EPR/1249/2014).

REFERENCES

Bau, M., & Dulski, P. (1996). Anthropogenic origin of positive gadolinium anomalies in river waters. *Earth and Planetary Science Letters*, *143*(1–4), 245–255. https://doi.org/10.1016/0012-821X(96)00127-6

Bau, M., Knappe, A., & Dulski, P. (2006). Anthropogenic gadolinium as a micropollutant in river waters in Pennsylvania and in Lake Erie, northeastern United States. *Chemie Der Erde - Geochemistry*, *66*(2), 143–152. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2006.01.002

Brito, P. (2019). Ecotoxicology of Marine Organisms. In B. Duarte & I. Caçador (Eds.), *Ecotoxicology of Marine Organisms* (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b22000

Brito, P., Cesário, R., & Monteiro, C. (2019). The Case of Least Known Metals with Potential Impacts in the Marine Environment. In A. H. Arias & S. E. Botté (Eds.), *Costal and Deep Ocean Pollution* (1st ed., p. 370). CRC Press.

Caetano, M., Vale, C., Raimundo, J., Bordado, J. C., Leal, J. P., Marçalo, J., Sardinha, J. P., Mil-Homens, M., Brito, P., & Silva, R. (2019). *REEUse Project - Final Report*.

Dutta, T., Kim, K. H., Uchimiya, M., Kwon, E. E., Jeon, B. H., Deep, A., & Yun, S. T. (2016). Global demand for rare earth resources and strategies for green mining. In *Environmental Research* (Vol. 150). https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.05.052

Ebrahimi, P., & Barbieri, M. (2019). Gadolinium as an Emerging Microcontaminant in Water Resources: Threats and Opportunities. *Geosciences*, *9*(2), 93. https://doi.org/10.3390/geosciences9020093

Huang, L., Zhao, P., Tang, D., Zhu, T., Han, R., Zhan, C., Liu, W., Zeng, H., Tao, Q., & Xia, L. (2020). Cardiac Involvement in Patients Recovered From COVID-2019 Identified Using Magnetic Resonance Imaging. *JACC: Cardiovascular Imaging*, *13*(11), 2330–2339. https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2020.05.004

Kulaksiz, S., & Bau, M. (2011). Rare earth elements in the Rhine River, Germany: First case of anthropogenic lanthanum as a dissolved microcontaminant in the hydrosphere. *Environment International*, *37*(5), 973–979. https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.02.018

Kümmerer, K., & Helmers, E. (2000). Hospital Effluents as a Source of Gadolinium in the Aquatic Environment. *Environmental Science & Technology*, *34*(4), 573–577. https://doi.org/10.1021/es990633h

Lawrence, M. G., Greig, A., Collerson, K. D., & Kamber, B. S. (2006). Rare Earth Element and Yttrium Variability in South East Queensland Waterways. *Aquatic Geochemistry*, *12*(1), 39–72. https://doi.org/10.1007/s10498-005-4471-8

McLennan, S. M. (1989). Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, *21*(1), 169–200.

Möller, P., Paces, T., Dulski, P., & Morteani, G. (2002). Anthropogenic Gd in surface water, drainage system, and the water supply of the City of Prague, Czech Republic. *Environmental Science and Technology*, *36*(11), 2387–2394. https://doi.org/10.1021/es010235q

Nassar, N. T., Du, X., & Graedel, T. E. (2015). Criticality of the Rare Earth Elements. *Journal of Industrial Ecology*, *19*(6). https://doi.org/10.1111/jiec.12237

OECD. (2021). *Magnetic resonance imaging (MRI) exams*. https://doi.org/https://doi.org/https://doi.org/10.1787/1d89353f-en

Perrat, E., Parant, M., Py, J. S., Rosin, C., & Cossu-Leguille, C. (2017). Bioaccumulation of gadolinium in freshwater bivalves. *Environmental Science and Pollution Research*. https://doi.org/10.1007/s11356-017-8869-9

Rabiet, M., Brissaud, F., Seidel, J. L., Pistre, S., & Elbaz-Poulichet, F. (2009). Positive gadolinium anomalies in wastewater treatment plant effluents and aquatic environment in the H??rault watershed (South France). *Chemosphere*, *75*, 1057–1064. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.01.036

Song, H., Shin, W.-J., Ryu, J.-S., Shin, H. S., Chung, H., & Lee, K.-S. (2017). Anthropogenic rare earth elements and their spatial distributions in the Han River, South Korea. *Chemosphere*, *172*, 155–165. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.135

Tepe, N., Romero, M., & Bau, M. (2014). High-technology metals as emerging contaminants: Strong increase of anthropogenic gadolinium levels in tap water of Berlin, Germany, from 2009 to 2012. *Applied Geochemistry*, *45*, 191–197. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.04.006

Water Framework Directive. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Parliament*.

Microplastics contamination in ria de Aveiro, ria Formosa, Mira and Mondego rivers

V. Morgado (1,2), L. Gomes (1), R. Bettencourt da Silva (2), C. Palma (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. vanessa.morgado@hidrografico.pt

(2) Centro de Química Estrutural, Institute of Molecular Sciences, Departamento de Química e Bioquímica, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal

Abstract: Statistics point out that more than 60% of the global composition of marine litter is plastic, and about 1.15 to 2.41 million tons of plastic are dumped into oceans every year from rivers. The awareness of this threat to the environment and human health attracted the scientific community to the monitoring of microplastic contamination in several aquatic systems. The monitoring of the level and trends of the contamination by microplastics is essential to determine the relevance and potential sources of this contamination necessary to define strategies to reduce it. The contamination is classified regarding microplastics' physical-chemical properties. This work presents microplastic contamination levels of sediments from Portuguese inland waters, namely Ria de Aveiro, Ria Formosa, Mira and Mondego rivers. Results demonstrated the ubiquitous presence of microplastics in these inland waters with contamination levels of [20 – 1090] MP kg^{-1}. This research highlights the need to promote procedures harmonisation to guarantee the comparability of monitoring results.

Keywords: environmental contamination, microplastics, monitoring, sediments.

1. INTRODUCTION

Plastics are well known for their valuable physical-chemical properties, e.g., thermal resistance, hardness, density, durability, etc., allowing for various applications. Therefore, since the 50s, the demand for these materials has continued to increase (Birley *et al.*, 1988).

Plastic production reached over 368 million tonnes worldwide and 57.9 million tonnes in Europe in 2019 (PlasticsEurope, 2019) due to its wide application. Current statistics point out that more than 60% of the global composition of marine litter is plastic, and about 1.15 to 2.41 million tons of plastic are dumped into oceans every year from rivers (Lebreton *et al.*, 2017; Tekman *et al.*, online).

The awareness of this threat to the environment and human health attracted the scientific community to the monitoring of (micro)plastics contamination in several aquatic systems and matrices, namely, surface water, column water, seafloor sediment, and beaches.

Microplastics are classified as plastic particles with sizes ranging between 1 µm and 5 mm (Frias and Nash, 2019). The monitoring of the level and trends of the contamination by microplastics is essential to determine the relevance and potential sources of this contamination necessary to define strategies to reduce it. Microplastics are characterised according to the polymer type (chemical identification), colour, shape and size (physical properties).

However, the impact of microplastics in open ocean, rivers, estuarine areas, and coastal regions compartments is only possible to understand if this contamination is characterised adequately and objectively.

This work presents the main results on the topic of microplastic contamination in sediments from four Portuguese inland waters: Ria de Aveiro, Ria Formosa, Mira and Mondego rivers. Further details of this study can be checked in the publication by Morgado *et al.* (Morgado *et al.*, 2022).

2. EXPERIMENTAL

2.1. Sampling

The samplings were carried out mainly in the framework of a large number of campaigns along Portuguese Continental west and south coasts, centre/north and south rivers and estuarine areas that aimed to identify areas adequate for aquaculture practice. These areas were studied regarding oceanographic, physical, chemical, geological, and biological characteristics. The assessment of the chemical characteristics comprises the determination of the presence of several inorganic and organic contaminants, including microplastics.

Sediments were sampled using a Petite Ponar Grab or a Ponar Grab 0.05 m^2 sampler with approximately 5 cm of penetration (Elliott and Drake, 1981). Sixty-three sediment samples were collected from Ria de Aveiro (RA), Ria Formosa (RF), Mondego river (RMo), and Mira river (RMi) by distinct campaigns between 2018 to 2020. Some samples were collected at the same geographical positions approximately a year after. Figures 1 presents the geographical positions of sediment sampling in the four studied environmental compartments.

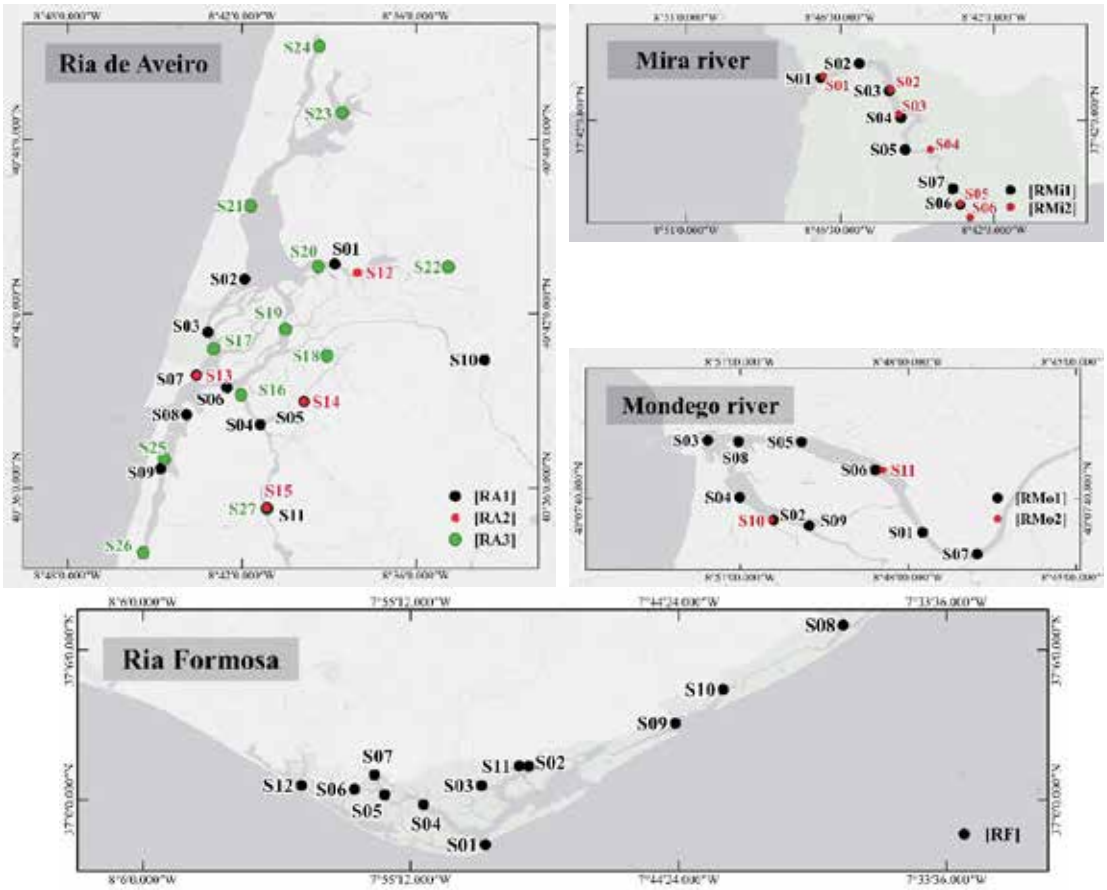


Fig. 1. Geographical positions of sediment sampling in three campaigns from Ria de Aveiro (RA1, RA2, and RA3), one campaign from Ria Formosa (RF), and two campaigns from Mira (RMi1 and RMi2) are Mondego rivers (RMo1 and RMo2).

2.2. Sample preparation

Sediment samples were prepared according to the following procedure:

i) sediment sieving through a 5 mm sieve to isolate sediment matter with the size range of microplastics;

ii) weighing the sieved sediment;

iii) digesting the weighted sediment using peroxide hydrogen (H_2O_2, 30% or 35%, Merck);

iv) separating the lighter microparticles from the densest matter of the samples using a saturated solution of sodium chloride (NaCl, 99.5%, AppliChem Panreac);

v) filtrating the saturated saline solution above the settled matter to a polycarbonate (0.45 µm pore size and Ø = 47 mm, Whatman) or glass fibre membrane (GF/C, 1.2 µm pore size and Ø = 47 mm, Roth);

vi) storing the filters in closed Petri dishes until analysis.

2.3. Microplastics analysis

The suspicious microparticles on the filters were analysed under a Leica MZ 16 F stereomicroscope using 10x to 25x amplification for the identification of their physical characteristics, namely the shape and colour. These properties were defined following the proposed guidelines by Frias et al. 2018. "Fibre/Filament" class was assigned whenever fibre and filament were indistinguishable. Regarding microplastics size, it was estimated by Spectrometer's software (Perkin Elmer). The distance between the two furthest points of microplastic was measured.

The chemical analysis was performed by the Perkin Elmer spectrometer Spotlight 200i Microscope System or by the PerkinElmer Spectrum Two FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy). Spectra were collected in reflectance, micro-ATR or ATR mode. Depending on the acquisition mode, spectra were recorded from 4000 cm^{-1} to 600 cm^{-1} or 500 cm^{-1}, using four or eight scans, and a strong Norton-Beer apodisation with 1 cm^{-1} and 4 cm^{-1} wavenumber and resolution intervals, respectively. The method for the identification of the polymer type of microplastics was validated by ensuring true and false identification rates were not lower than 95% or higher than 5%, respectively (Morgado *et al*., 2021a; Morgado *et al.*, 2021b).

2.4. Quality control/Quality assurance

The under- and overestimate counts of microplastics in the samples was prevented by the implementation of some measures which are essential to ensure the reliability of the results. The limitation of the use of plastic materials during sample preparation was also

a measure implemented. Metal and glass materials were used instead, and all materials were properly cleaned before use.

However, the results can be overestimated due to airborne or cross contaminations. The analysts that handled the samples used white cotton lab coats and blue nitrile gloves, which advised excluding some white fibres observed on samples since these particles also appeared on top of the membranes used to monitor airborne contaminations.Regarding airborne contamination, the samples were always covered, except when they were being manipulated under a fume hood. A fume hood is able to reduce the exposure to airborne contamination to approximately 50% (Wesch *et al.*, 2017). The entire membranes were analysed to minimise the underestimation of results, contrarily to the suggested by some authors that only analyse a portion of it (Mintenig *et al.*, 2020).

Negative and positive controls were performed, providing information on the levels of contamination during sample processing and on the sample processing efficiency, respectively. The negative control consisted of a blank membrane exposed to the air whenever the samples were. On the other hand, the positive control consisted of spiking some sediments samples with a known amount of microplastics.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Chemical properties

1134 microparticles suspected to be microplastics were isolated under stereomicroscope and analysed by FTIR. After spectra interpretation, only 40.9% (464) of the microparticles were identified as being microplastics. Figure 2 presents the percentage of microplastics per type of polymer identified.

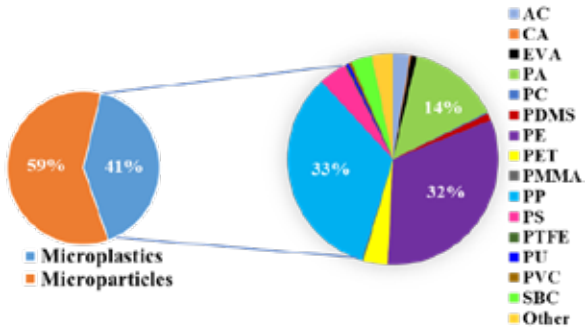
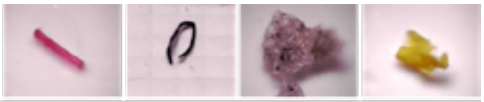


Fig. 2. Percentage of microplastics found in the samples divided per polymer type. Acrylate copolymer (AC),cellulose acetate (CA), ethylene vinyl acetate (EVA), polyamide (PA), polycarbonate (PC), polydimethylsiloxane (PDMS), polyethylene (PE), polyethylene terephthalate (PET), polymethylmethacrylate (PMMA), polypropylene (PP), polystyrene (PS), polytetrafluoroethylene (PTFE), polyurethane (PU), polyvinyl chloride (PVC), styrene butadine copolymer (SBC).

The identified polymers were distributed into 16 categories, three of which correspond to copolymers (AC, EVA, and SBC), and the category "Other" includes a spectrum that results from mixing PE and PP or microplastics with inconclusive identification.

3.2. Physical properties

The identified polymers were distributed into six shapes, two size ranges (lower or above 1000 µm) and 11 colours. Figure 3 presents some examples of microplastics found.



Polymer	PP	PET	PS	PE
Shape	Fragment	Fibre	Fragment	Fragment
Colour	Red	Black	Translucent	Yellow
Size (µm)	227	895	309	220

Fig. 3. Example of physical characteristics of some microplastics.

More than 85% of the microplastics found were fragments lower than 1000 µm. The colours assigned were very diverse, the class that included more microplastics (around 25%) was translucent.

3.3. Number concentration of microplastics

Figure 4 presents the variability of the number concentration of microplastics in the studied environmental compartments. The results were expressed as kg^{-1}, according to the International System of Units (BIPM, 2019). The blue dots presents the mean value of the samples of the same campaign.

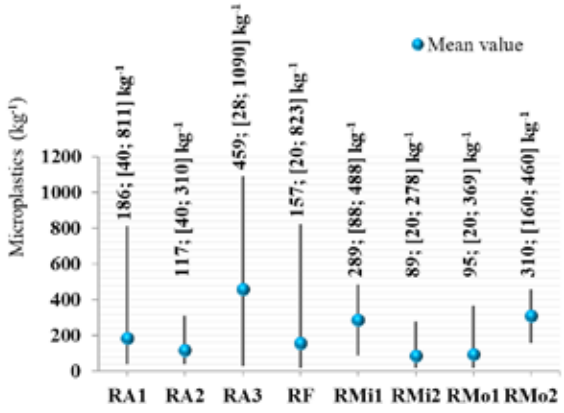


Fig. 4. Number concentration of microplastics per environmental compartment.

The samples S01 [RA1], S12 [RA2], S22 [RA3], S11 [RF], S01 [RMi1], S08 [RMi2], S09 [RMo1], and S10 [RMo2] presented the greater number concentration of its own campaign. While S06 [RA1], S13 [RA2], S20 [RA3], S04 [RF], S03 [RMi1], S10 [RMi2], S01 [RMo1], and S11 [RMo2] samples presented the lower values, excluding six samples from RA3 that were not contaminated with microplastics.

However, it was not identified relevant trends regarding the spatial distribution of microplastics.

The possible main sources that led to the higher contaminations of the mentioned locals were the following: industrial influences in RA, agricultural influences in RA and RMi, proximity to urban sites in RF, seasonal occupation in RMi, and influence from the tide in RMo.

4. CONCLUSIONS

The presence of microplastics in Ria de Aveiro, Ria Formosa, Mira and Mondego rivers is unequivocal. Only six samples from RA were not contaminated with microplastics, perhaps due to lower industrial and agricultural influences in the correspondent sampling positions. The microplastics found were mainly fragments lower than 1000 µm identified as PP (33%) and PE (32%). The remaining polymer types were identified as below 15%. The number concentration of microplastic per kilogram of sediment varied between 20 kg^{-1} to 1090 kg^{-1}. Even so, at least one sample from each compartment presented a number concentration greater than 278 kg^{-1}. The results of this study are helpful for future studies on identifying possible sources and ecotoxicological risks from microplastics, as well as to be compared with other researches from different locations if their results are adequally reported .

Acknowledgments

This work was supported by the Instituto Hidrográfico through the MONIAQUA research program, the Universidade de Lisboa through a PhD Scholarship 2018, the Operational Program Mar2020 through project "AQUIMAR – Caracterização geral de áreas aquícolas para estabelecimento de culturas marinhas" (MAR2020 n° MAR-02.01.01-FEAMP-0107), Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) through projects UIDB/00100/2020 and UIDP/00100/2020, and Integrated Program of SR&TD "Smart Valorization of Endogenous Marine Biological Resources Under a Changing Climate" (reference Centro-01-0145-FEDER-000018) co-funded by Centro 2020 program, Portugal 2020 and European Union through the European Regional Development Fund.

REFERENCES

Birley, A.W., Heath, R.J., Scott, M.J. (1988). *Plastics Materials, Properties and Applications*. Springer Science+Business Media, New York.

Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). (2019). *The International System of Units (SI)*, 9th ed.

Elliott, J.M., Drake, C.M. (1981). A comparative study of seven grabs used for sampling benthic macroinvertebrates in rivers. *Freshwater Biology*, 11, 99-120.

Frias, J., Pagter, E., Nash, R., O'Connor, I., Carretero, O., Filgueiras, A., Viñas, L., Gago, J., Antunes, J., Bessa, F., Sobral, P., Goruppi, A., Tirelli, V., Pedrotti, M.L., Suaria, G., Aliani, S., Lopes, C., Raimundo, J., Caetano, M., Palazzo, L., Lucia, G.A., Camedda, A., Muniategui, S., Grueiro, G., Fernandez, V., Andrade, J., Dris, R., Laforsch, C., Scholz-Böttcher, B.M., Gerdts, G. (2018). Standardised protocol for monitoring microplastics in sediments, Deliverable 4.2, 24. JPI-Oceans BASEMAN project.

Frias, J., Nash, R. (2019). Microplastics, Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145-147.

Lebreton, L., van der µZwet, J., Damsteeg, J., Slat, B., Andrady, A., Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, 8, 15611.

Mintenig, S.M., Kooi, M., Erich, M.W., Primpke, S., Redondo-Hasselerharm, P.E., Dekker, S.C., Koelmans, A.A., van Wezel, A.P. (2020). A systems approach to understand microplastic occurrence and variability in Dutch riverine surface waters. *Water Research*, 176, 115723.

Morgado, V., Palma, C., Bettencourt da Silva, R.J.N. (2021a). Microplastics identification by Infrared spectroscopy – evaluation of identification criteria and uncertainty by the Bootstrap method. *Talanta*, 224, 121814.

Morgado, V., Gomes, L., Bettencourt da Silva, R.J.N., Palma, C. (2021b). Validated spreadsheet for the identification of PE, PET, PP and PS microplastics by micro-ATR-FTIR spectra with known uncertainty. *Talanta*, 234, 122624.

Morgado, V., Gomes, L., Bettencourt da Silva, R.J.N., Palma, C. (2022). Microplastics contamination in sediments from Portuguese inland waters: Physical-chemical characterisation and distribution. *Science of The Total Environment*, 832, 155053.

PlasticsEurope Association of Plastics Manufactures. (2019). Plastics – the Facts 2020 An analysis of European plastics production, demand and waste data. Available at http://www.plasticseurope.org.

Tekman, M.B., Gutow, L., Macario, A., Haas, A., Walter, A., Bergmann, M. Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung. Litterbase. Online portal for marine litter. Available at https://litterbase.awi.de/.Wesch, C., Elert, A.M., Worner, M., Braun, U., Klein, R., Paulus, M. (2017). Assuring quality in microplastic monitoring: About the value of clean-air devices as essentials for verified data. *Scientific Reports*, 7, 5424.

Aquaculture planning - determination of biological and physico-chemical parameters to assess the potential of fish and shellfish offshore aquaculture

M. Mosqueira (1), A. Pombo (1), C. Borges (2), N. Zacarias (2), R. Esteves (2), A. Brito (3), C. Palma (2)

(1) MARE—Marine and Environmental Sciences Centre, ESTM, Polytechnic Institute of Leiria, 2520-641 Peniche, Portugal

(2) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal

(3) MARE—Marine and Environmental Sciences Centre, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal

Abstract: The physicochemical and biological parameters along the Portuguese coast were analysed to potentially increase the rearing of some fish (*Sparus aurata*, *Dicentrarchus labrax, Argyrosomus regius, Seriola dumerili, Sardina pilchardus*, *Salmo salar*) and bivalve (*Mytilus edulis*, *Pecten maximus*, *Magallana gigas, Ruditapes decussatus*) species. Water samples were collected in five different areas of the Portuguese coast in four field surveys between 2018 and 2020. The northernmost areas presented the lowest temperatures and the highest levels of chlorophyll *a* and nitrate so the rearing of *Salmo salar*, *Sardina pilchardus, Mytilus edulis* and *Pecten maximus* can be considered, but preferably in land-based systems specially because of wave height. The southernmost areas, due to the highest temperatures, seems appropriate for *Argyrosomus regius*, *Sparus aurata*, *Dicentrarchus labrax,* and *Seriola dumerili*, however pilot studies are essential to validate its potential.

Keywords: growth factors; spatial planning; site selection; species selection

1. INTRODUCTION

The current state of aquaculture plays a critical role in providing food and employment to millions of people. For this reason, aquaculture has been identified as the food industry with the highest annual growth rate with a growth rate of 5.3 percent per year in the period 2001–2018 (FAO, 2020) and offshore aquaculture is being accepted as a sustainable, economical, and viable form of food production in many coastal nations (Thomas *et al.,* 2019*)*. There is a very close relationship between the water quality and the survival and health of organisms, where poor water quality can cause mortality, slow growth, and can induce stress, reducing the survival, health and welfare of farmed animals. As such, it is required to ensure adequate physico-chemical conditions for the well-being of aquatic organisms.

1.2. Objectives

This study is part of the "Aquimar project—General characterization of aquaculture areas for the establishment of marine cultures" which aims to characterize the oceanographic, physico-chemical, geochemical, and biological conditions of the Portuguese coastal waters, in order to optimize the selection of sites and species for coastal and offshore aquaculture. The results of physical-chemical and biological parameters such as temperature, ocean currents, waves, ammonia, nitrite, nitrate, silicate, phosphate, dissolved oxygen, salinity, pH, and chlorophyll *a* could help to develop new offshore aquaculture facilities of fish and bivalve in the Portuguese coast.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Field Surveys

This study was conducted alongside the Portuguese Coast in 5 areas (Figure 1) with field surveys in 2 different periods between 5 and 26 October 2018 (2018) and between 13 April and 14 May 2019 (2019).

2.2. Species Selection

A few authors (Ojea et al., 2008; Duncan et al., 2013; Føre et al*.,* 2018*;* Sikveland et al., 2020; Islam et al*.,* 2020) have identified some promising species to be developed in offshore aquaculture as some of them are native and are economically interesting. Among them are fish such as the meagre *Argyrosomus regius*, salmon *Salmo salar*, gilthead sea bream *Sparus aurata*, sea bass *Dicentrarchus labrax*, sardine *Sardina pilchardus*, and greater amberjack *Seriola dumerili*; mollusks bivalves such as mussel *Mytilus edulis*, scallop *Pecten maximus*, Pacific oyster *Magallana gigas*, and razor clam *Ruditapes decussatus*.



Fig. 1. Field surveys areas marked in grey on the map: A- Area A (between Viana do Castelo and Oporto); B—Area B (between Aveiro and Figueira da Foz); C—Area C (Peniche); D—Area D (between Setúbal and Sines); E—Area E (Algarve region)).

2.3. Statistical Analysis and Data Processing

The concentration of nutrients (ammonia, nitrite, nitrate, silicate, phosphate), chlorophyll *a*, dissolved oxygen, temperature, salinity, pH, and chlorophyll *a* data were analyzed by two-way ANOVA using IBM SPSS™ Statistics for Windows, version 23 (IBM Corporation, Armonk, NY, USA). Differences between the means were tested using the Tukey HSD test post hoc. Significant differences were considered when $p < 0.05$.

3. RESULTS

During the field surveys of 2018 and 2019, ammonia, nitrite, and phosphate systematically revealed concentrations below the respective limits of quantification in all areas. In both field surveys, Area A presented the highest mean concentrations of nitrate (1.27 and 1.8 µmol L^{-1}), while Areas B (0.55 and 0.75 µmol L^{-1}) and D (0.53 and 0.77 µmol L^{-1}) showed the lowest mean values in both surveys, however, no significant differences were detected between both years ($p > 0.05$). Furthermore, Area A also displayed the highest concentrations of chlorophyll *a* in both field surveys (2.03 and 5.12 µg L^{-1}), whereas Areas E (0.30 µg L^{-1}) and C (1.06 µg L^{-1}) presented the lowest mean concentrations in 2018 and 2019, respectively. Although without statistically significant differences ($p > 0.05$), the area that showed the highest silicate concentrations (3.04 and 2.17 µmol L^{-1}) was Area C in both surveys, and Areas D and B indicated the lowest concentrations (1.58 and 1.20 µmol L^{-1}) in 2018 and 2019, respectively. Dissolved oxygen showed statistically significant differences between years ($p < 0.05$) in area A, with a lower dissolved oxygen value in 2018 (7.66 mg L^{-1}) than in 2019 (9.23 mg L^{-1}). The pH showed a very homogeneous behavior between areas and surveys while salinity presented significantly higher values in the south. It can be noted that the highest temperatures were measured during the 2018 survey (Figure 2). Area E presented the highest surface temperatures and Area A the lowest surface temperatures in both surveys.

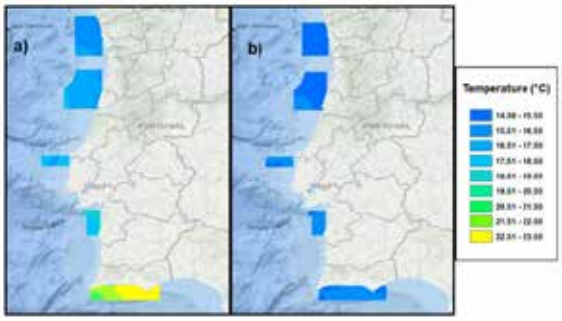


Fig. 2. Map of surface temperature (°C) in the 5 study areas of the Portuguese coast in (a) October 2018 and (b) April 2019 surveys.

4. DISCUSSION

Temperature is one of the most important factors to decide the location of offshore and coastal aquaculture implementation and species selection. For fish, it is the only relevant physico-chemical parameter that requires analysis, since all of the studied values are within production limits. The bivalves require further parameters to optimize growth rates, such as, chlorophyll *a*.

4.1. Fish

The meagre has a high tolerance to various temperature and salinity values. This characteristic allows the meagre *Argyrosomus regius* to develop in various habitats, including the Mediterranean, Black Sea, and on the west coast of Europe and Africa. Such versatility allows the meagre to grow in all areas of the Portuguese coast since no temperature value reached the minimum values of 13.0 °C and the maximum values of 28.0 °C. However, the area that presents better conditions to produce the meagre is Area E, where temperatures above 20 °C were observed since the optimal temperature of this species is between 20.0–26.0 °C (Antonopoulou *et al.,* 2020).

The Atlantic salmon *Salmo salar* requires low temperature for optimal growth, and these conditions are only found in the coastal regions of the north and center of Portugal. The field surveys data highlight that only in Areas A, B, and C, is the production of this species possible. In Areas D and E, the maximum temperature limits (18.0 °C) are exceeded according to the tolerated temperature values for this species (Elliot and Elliot, 2010).

During the two surveys performed, none of the areas studied presented temperatures lower than 13.0 °C for surface waters. This is the temperature at which several authors suggest that gilthead sea bream *Sparus aurata* stops feeding. Some authors refer that the optimal temperature for gilthead sea bream *Sparus aurata* is between 22.0–26.0 °C (Kir *et al.,* 2020). From both field surveys, only Area E, in October

2018, showed optimal mean temperature values for this species growth (22.5 °C).

In the two field surveys, no temperature value exceeds the limits tolerable to the rearing of the sea bass *Dicentrarchus labrax*. These results indicate that it is possible to install sea bass fish farms offshore throughout the Portuguese coast. However, for optimal growth, only Area E, shows the optimal temperatures (20.0–25.0 °C) referred by other authors (Zhang *et al.,* 2021).

The temperature data obtained in the field surveys indicates that it is possible to farm sardine *Sardina pilchardus* along the Portuguese coast. The optimal temperature is between 15.5 °C and 17.5 °C (Dulger *et al.,* 2012) and, as such, the areas that are outside this limit are Areas D and E, where temperatures were above 17.5 °C in the 2018 survey.

The greater amberjack *Seriola dumerili* requires high temperatures to grow, and these conditions can only be observed in the Algarve coast (Area E) or in the Portuguese islands such as São Miguel Island in the Azores archipelago, where cage production already exists. Fish meal substitution in the diet was possible for this species for long periods without affecting growth with water temperature maintained at 21.5 ± 2.4 °C (Monte-Ortiz *et al.,* 2020) and, for that, Area E is the best choice.

4.2. Bivalves

Focusing on field surveys data, mussel *Mytilus edulis* growth can be compromised in Area E, as this mussel has an optimal temperature range of 10.0–20.0 °C (Kittner and Risgaard, 2005), and this area showed a mean temperature of 22.5 °C in October 2018. However, currently, it is in this area where most of the mussel farms in extensive offshore systems take place. Observing the chlorophyll *a* data and considering that the site selection should match, as much as possible, with the physiological needs of mussels to reach a commercial size in the shortest possible period, the area approaching the ideal concentration of chlorophyll *a* was Area A, with mean concentrations of 2.03 µg L^{-1} in October 2018 and 5.12 µg L^{-1} in April 2019.

All areas in the April 2019 field survey present ideal conditions to implement scallop *Pecten maximus* production. However, only Area A shows optimal temperature values (10–17 °C) in the October 2018 field survey, according to the reference temperature (Laing, 2000) and with minimum temperature limits of 4 °C and maximum temperature of 22.9 °C (Laing, 2000). The scallop *Pecten maximus* achieves faster growth with a microalgae concentration of 300 µg L^{-1} (*Rhodomonas baltica*) in experimental trials (Bergvik *et al*., 2019). It is worth mentioning that Area A showed a higher chlorophyll *a* mean concentration but was still far below the values described in the trials.

The Pacific oyster is already produced, together with Portuguese oyster, in the Sado estuary. An older study (Malouf and Breese, 1977) suggests that under ideal conditions and with high food availability, maximum growth for *Magallana gigas* might be achieved at temperatures approaching 20.0 °C. Only field survey of 2018 showed one area where this temperature range is noticeable, namely Area D (18.6 °C; mean).

The razor clam has a range of optimal temperatures depending on its geographical origin. The populations of this species exhibit optimal spawning temperatures of 20.0 ± 1.0 °C in the north of the Iberian Peninsula and 22.0 ± 1.0 °C in the south of the Iberian Peninsula (Matias *et al.,* 2009). Usually, clams are produced in onshore nurseries and buried in the sediment, however, its offshore production has been done recently by a Portuguese company that grown this species offshore on the southern coast (Area E).

5. CONCLUSIONS

The implementation of aquacultures in open sea conditions seems possible for the meagre *Argyrosomus regius*, Atlantic salmon *Salmo salar*, gilthead sea bream *Sparus aurata*, sea bass *Dicentrarchus labrax*, sardine *Sardina pilchardus*, greater amberjack *Seriola dumerili*, mussel *Mytilus edulis*, scallop *Pecten maximus*, Pacific oyster *Magallana gigas* and razor clam *Ruditapes decussatus*, but the implementation of new structures must be preceded by dedicated studies that consider the type of structure for a specific location.

Acknowledgements

This study had the financial support of Operational Programme MAR2020 through the project MAR–02.01.01–FEAMP-0107 "AQUIMAR - Marine knowledge supporting aquaculture", and the support of Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), through the strategic project UIDB/ 04292/2020 granted to MARE-Marine and Environmental Sciences Centre. AP and ACB were supported through the Scientific Employment Stimulus Programmes (CEECINST/00051/2018 and CEECIND/00095/2017, respectively).

REFERENCES

Antonopoulou, E., Chatzigiannidou, I., Feidantsis, K., Kounna, C., Chatzifotis, S. (2020). Effect of water temperature on cellular stress responses in meagre (*Argyrosomus regius*). *Fish Physiol. Biochem*. *46*, 1075–1091.

Bergvik, M., Stensås, L., Handå, A., Reitan, I., Strand, Ø., Olsen, Y. (2019). Incorporation of Feed and Fecal Waste from Salmon Aquaculture in Great Scallops (*Pecten maximus*) Co-fed by Different Algal Concentrations. *Adv. Mar. Sci*., *5*. doi:10.3389/fmars.2018.00524.

Dulger, N., Kumlu, M., Türkmen, S., Ölçülü, A., Eroldoğan, O., Yilmaz, H., Öçal, N. (2012). Thermal tolerance of European Sea Bass

(*Dicentrarchus labrax*) juveniles acclimated to three temperature levels. *J. Therm. Biol*., *37*, 79–82.

Duncan, J., Estévez, A., Fernández-Palacios, H., Gairin, I., Hernández-Cruz, M., Roo, J., Schuchardt, D., Vallés, R. (2013) Aquaculture production of meagre (*Argyrosomus regius*): Hatchery techniques, ongrowing and market. In *Advances in Aquaculture Hatchery Technology*; Geoff Allan, Gavin Burnell (Eds.), Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 519–541.

Elliott, M., Elliott, A. (2010). Temperature requirements of atlantic salmon *Salmo salar*, brown trout *Salmo trutta* and arctic charr *Salvelinus alpinus*: Predicting the effects of climate change. *J. Fish Biol*, *77*, 1793–1817.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. *The State of World Fisheries and Aquaculture*; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2020; pp. 21–36.

Føre, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J., Dempster, T., Berckmans, D. (2018). Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture. *Biosyst. Eng*., *173*, 176–193.

Islam, M.J., Kunzmann, A., Bögner, M., Meyer, A., Thiele, R., James, M. (2020). Metabolic and molecular stress responses of European seabass, *Dicentrarchus labrax* at low and high temperature extremes. *Ecol. Indic.*, *112*, 106118.

Kır, M. (2020). Thermal tolerance and standard metabolic rate of juvenile gilthead seabream (*Sparus aurata*) acclimated to four temperatures. *J. Therm. Biol*., *93*, 102739.

Kittner, C., Risgaard, H. (2005). Effect of temperature on filtration rate in the mussel *Mytilus edulis*: No evidence for temperature compensation. *Mar. Ecol. Prog. Ser*., *305*, 147–152.

Laing, I. (2000). Effect of temperature and ration on growth and condition of king scallop (*Pecten maximus*) spat. *Aquacult*, *183*, 325–334.

Malouf, E., Breese, P. (1977) Seasonal changes in the effects of temperature and water flow rate on the growth of juvenile Pacific oysters, *Magallana gigas* (Thunberg). *Aquacult*, *12*, 1–13.

Matias, D., Joaquim, S., Leitão, A., Massapina, C. (2009). Effect of geographic origin, temperature and timing of broodstock collection on conditioning, spawning success and larval viability of *Ruditapes decussatus* (Linné, 1758). *Aqua. Int*., *17*, 257–271.

Monge-Ortiz, R., Martínez-Llorens, S., Lemos-Neto, M., Falcó-Giaccaglia, S., Pagán, M., Godoy-Olmos, S., Tomás-Vidal, A. (2020). Growth, sensory and chemical characterization of Mediterranean yellowtail (*Seriola dumerili*) fed diets with partial replacement of fish meal by other protein sources. *Aquac. Rep*., *18*, 100466.

Ojea, J., Pazos, A.P., Martínez, D., Novoa, S., García-Martínez, P., Sánchez, J.L., Abad, M. (2008) Effects of temperature regime on broodstock conditioning of *Ruditapes decussatus*. *J. Shellfish Res*., *27*, 1093–1100.

Sikveland, M., Zhang, D. (2020). Determinants of capital structure in the Norwegian salmon aquaculture industry. *Mar. Policy*, *119*, 104061.

Thomas, R., Clavelle, T., Klinger, H., Lester, E (2019). The ecological and economic potential for offshore mariculture in the Caribbean. *Nat. Sustain*., *68*, 219–225.

Zhang, Z., Zhou, C., Fan, K., Liu, Y., Liu, P. (2021). Metabolomics analysis of the effects of temperature on the growth and development of juvenile European seabass (*Dicentrarchus labrax*). *Sci. Total Environ.*, *769*, 145–155.

An extension of the "Microplastics contamination in ria de Aveiro, ria Formosa, Mira and Mondego rivers": evaluation of the measurement uncertainty

V. Morgado (1,2), C. Palma (1), R. Bettencourt da Silva (2)

(1) Instituto Hidrográfico, R. Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. vanessa.morgado@hidrografico.pt

(2) Centro de Química Estrutural, Institute of Molecular Sciences, Departamento de Química e Bioquímica, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal

Abstract: The concern with the contamination of the environment with micro(plastics) is very trending nowadays since this material is ubiquitous. This work presents the first bottom-up evaluation of the uncertainty of microplastics contamination quantification in sediments from four Portuguese inland waters, namely Ria de Aveiro, Ria Formosa, Mira and Mondego rivers. The bottom-up evaluation of the uncertainty of microplastics contamination quantification involved the identification and quantification of systematic and random effects affecting laboratory analysis. The uncertainty components affecting particles counting were modelled and combined by the Poisson Lognormal distribution and the Monte Carlo Method, respectively. Results demonstrated the ubiquitous presence of microplastics in all studied inland waters, reaching up to 969 microplastics per kg^{-1} associated with an uncertainty interval of [361; 2932] kg^{-1}. After the comparison of the contamination of sediment samples collected in various Portuguese inland waters, it was concluded that several samples had metrologically different contamination for 99% confidence level.

Keywords: environmental contamination, microplastics, sediments, uncertainty, validation.

1. FRAMEWORK

Microplastics are particles of non-natural polymeric matrix that size between 1 µm and 5 mm (Frias and Nash, 2019). Actually, microplastics are contaminating many aquatic systems worldwide as open oceans, seas, rivers, and estuarine areas (Lebreton *et al.*, 2017; Tekman *et al.*, online). The large presence of microplastic in the environment is attracting the scientific community to the monitoring of these contaminants in several aquatic environments and matrices. The relevance and potential sources of this contamination is only understood if the monitoring of the level and trends of the contamination is objectively characterized. Thus, strategies to reduce this contamination can be design and adequately implanted.

This work improved the objective determination of microplastic contamination of sediments from a previous study (Morgado *et al.*, 2022) through the development of a methodology for the evaluation of uncertainty of these quantifications applied to sediments samples from Ria de Aveiro (RA), Ria Formosa (RF), Mondego river (RMo), and Mira river (RMi).

2. EXPERIMENTAL

After sampling, sediment samples were prepared according to the following procedure:

i) Sediment sieving to isolate sediment matter with the size range of microplastics;

ii) Weighing sieved sediment;

iii) Digesting the aliquot using peroxide hydrogen (H_2O_2);

iv) Separating the lighter microparticles from the densest matter of the samples using a saturated solution of sodium chloride (NaCl);

v) Filtrating the NaCl solution above the settled matter to an adequate filter;

vi) Storing filters in closed Petri dishes.

The suspicious microparticles on the filters were analysed under a stereomicroscope for the identification of their physical characteristics. The chemical analysis was performed by the Perkin Elmer spectrometer Spotlight 200i Microscope System or by the PerkinElmer Spectrum Two FTIR (Morgado *et al.*, 2021).

3. SYNOPSIS

The present work describes the first bottom-up evaluation of the uncertainty of the quantification of microplastics in environmental sediment samples.

The bottom-up evaluation of the uncertainty of microplastics contamination quantification involved the identification and quantification of systematic and random effects affecting laboratory analysis.

According to bottom-up approach, different probability density functions were considered to model the identified sources of uncertainty:

i) Poisson-Lognormal distribution that derives from the general Poisson distribution for which the distribution parameter (λ; *i.e.*, mean and variance) follows itself a Lognormal distribution (Jongenburger *et al.*, 2012). The Poisson-Lognormal distribution is used to model the random and systematic components that affect the counting of microplastics, using inputs estimated from duplicate sediment analysis and the analysis of sediments spiked with microparticles, respectively.

ii) Continuous rectangular and *t*-Student distributions (Ellison and Williams, 2012) associated with uncertainty components of the sediment sample weighting, such as analytical portion and dry weight determination.

Regarding the distribution of the ratio of the number of microplastics per dry mass of sediment, it was modeled by combining the aforementioned distributions by the Monte Carlo method (MCM).

The developed methodology was implemented in a user-friendly MS-Excel spreadsheet used to simulate the probability distribution function of the estimate of the measurand. Thus, the distribution percentiles were used to define confidence limits that encloses the true value of the contamination with a defined probability.

The methodology developed was applied to the quantification of the following types of particles in sediments:

i) microplastics less dense than a saturated aqueous solution of NaCl, regardless of their physical-chemical properties (T);

ii) micro-fragments of polypropylene (PP);

iii) polyethylene terephthalate microparticles (PET).

Results demonstrated that the sediment samples collected from RA, RF, RMi and RMo are undoubtedly contaminated with microplastics, reaching up to 969 microplastics per kg^{-1} associated with an uncertainty interval of [361; 2932] kg^{-1}. As far as the authors know, this work also presents the first objective comparison of contamination by microplastics of environmental samples considering the estimated uncertainty of the difference in the results obtained. After the comparison of the contamination of sediment samples collected in various Portuguese inland waters, it was concluded that several samples had metrologically different contamination for 99% confidence level.

Acknowledgments

This work was supported by the Instituto Hidrográfico through the MONIAQUA research program, the Universidade de Lisboa through a PhD Scholarship 2018, the Operational Program Mar2020 through project "AQUIMAR – Caracterização geral de áreas aquícolas para estabelecimento de culturas marinhas" (MAR2020 n° MAR-02.01.01-FEAMP-0107), Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) through projects UIDB/00100/2020 and UIDP/00100/2020, and Integrated Program of SR&TD "Smart Valorization of Endogenous Marine Biological Resources Under a Changing Climate" (reference Centro-01-0145-FEDER-000018) co-funded by Centro 2020 program, Portugal 2020 and European Union through the European Regional Development Fund.

REFERENCES

Ellison, S.L.R., Williams, A. (Eds), (2012). Eurachem/ CITAC guide: Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement, 3rd ed.

Frias, J., Nash, R. (2019). Microplastics, Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145-147.

Jongenburger, I., Bassett, J., Jackson, T., Zwietering, M.H., Jewell, K. (2012). Impact of microbial distributions on food safety I. Factors influencing microbial distributions and modelling aspects, *Food Control*, 26, 601-609.

Lebreton, L., van der µZwet, J., Damsteeg, J., Slat, B., Andrady, A., Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, 8, 15611.

Morgado, V., Gomes, L., Bettencourt da Silva, R.J.N., Palma, C. (2021). Validated spreadsheet for the identification of PE, PET, PP and PS microplastics by micro-ATR-FTIR spectra with known uncertainty. *Talanta*, 234, 122624.

Morgado, V., Gomes, L., Bettencourt da Silva, R.J.N., Palma, C. (2022). Microplastics contamination in sediments from Portuguese inland waters: Physical-chemical characterisation and distribution. *Science of The Total Environment*, 832, 155053.

Tekman, M.B., Gutow, L., Macario, A., Haas, A., Walter, A., Bergmann, M. Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung. Litterbase. Online portal for marine litter. Available at https://litterbase.awi.de/.Wesch, C., Elert, A.M., Worner, M., Braun, U., Klein, R., Paulus, M. (2017). Assuring quality in microplastic monitoring: About the value of clean-air devices as essentials for verified data. *Scientific Reports*, 7, 5424.

AQUIMar: avaliação da presença de microplásticos na costa Portuguesa

L. Gomes (1), V. Morgado (1, 2), C. Palma (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. Bras.Gomes@hidrografico.pt

(2) Centro de Química Estrutural, Institute of Molecular Sciences, Departamento de Química e Bioquímica, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande 1749-016 Lisboa, Portugal

Resumo: Apesar da maioria dos plásticos ser descartada em terra, o destino mais provável são os oceanos, onde se fragmentam sucessivamente em microplásticos. No âmbito do projeto AQUIMar, foram colhidas amostras de sedimentos em cinco áreas da Plataforma Continental Portuguesa com profundidades a variar entre 25 e 250 metros para a determinação quantitativa e qualitativa de microplásticos. Foram analisadas 152 amostras, verificando-se uma incidência de 54% e densidades acima dos 100 microplásticos por quilograma de sedimento. Foram detetados 358 microplásticos, dos quais os polímeros mais abundantes foram o polipropileno e o polietileno, e preto e azul as cores mais frequentes. Este estudo revela a presença de microplásticos em toda a extensão da costa portuguesa, evidencia uma correlação positiva entre a abundância e a urbanização e representa uma importante base de informação e uma séria confirmação da necessidade de monitorizar este tipo de poluição.

Palavras-chave: microplásticos, sedimentos, plataforma continental Portuguesa.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a poluição plástica nos oceanos tem sido motivo de preocupações acrescidas por representar uma ameaça real ao ecossistema e à saúde humana. O plástico representa a esmagadora maioria dos resíduos sólidos criados e, apesar de grande parte dos plásticos ser descartada em terra, o destino mais provável são os oceanos (Barboza *et al*., 2019). Nos oceanos, e durante o seu percurso, os plásticos degradam-se e fragmentam-se sucessivamente em plásticos mais pequenos ao ponto de se tornarem microplásticos. Os microplásticos definem uma gama surpreendentemente ampla de dimensões de partículas, incluindo partículas de dimensões compreendidas entre 1 µm e 5 mm (Frias et al. 2019). Abaixo dos 2 mm, inclusive, são considerados microplásticos pequenos enquanto acima do mesmo valor são denominados microplásticos grandes. Estima-se que a presença destes pequenos fragmentos nos oceanos duplique em 2030 (Hale et al. 2020).

Este estudo faz parte do projeto AQUIMar, o qual tem como principais objetivos a identificação dos locais com maior aptidão para a prática da aquacultura, e, como tal, é necessária a sua caracterização. No âmbito deste projeto, conduzido pela Divisão de Química e Poluição do Meio Marinho do Instituto Hidrográfico, este estudo avalia quantitativa e qualitativamente os microplásticos na costa portuguesa, com áreas de estudo entre Viana do Castelo e Portimão. O estudo, ainda em desenvolvimento, consiste numa análise sazonal, num total de várias centenas de amostras de sedimento marinho colhidas entre os 16 e os 260 metros de profundidade.

Os resultados mostram a indubitável presença de microplásticos na costa portuguesa, com uma incidência a rondar os 54 % e densidades máximas acima dos 100 microplásticos por quilograma de sedimento seco (N/kg DW). Foram, até ao momento, detetados 358 microplásticos, dos quais os polímeros mais abundantes são o polipropileno (PP), o polietileno (PE) e o polietileno tereftalato (PET) e as cores mais frequentes são o preto e o azul.

A quantificação e caracterização dos microplásticos é importante para estudar a sua distribuição espacial e temporal, para determinar taxas de acumulação, para investigar poluentes orgânicos sorvidos, e avaliar os impactos negativos nos organismos marinhos.

Este estudo confirma a presença de microplásticos em toda a extensão da costa portuguesa, mostra evidências da correlação positiva entre a abundância de microplásticos e a atividade humana intensiva e urbanização e, introduzidos os aspetos importantes que o estudo dos microplásticos tem para o futuro, representa uma importante base de informação que possa servir de apoio ao desenvolvimento de metodologias que combatam este tipo de poluição.

2. MÉTODOS E EQUIPAMENTO

2.1. Área de estudo

O estudo compreende as zonas de Leixões [Porto a Viana do Castelo (Área A)], de Aveiro a Figueira da Foz (Área B) e toda a região costeira do Algarve (Área E) (Fig. 1.).

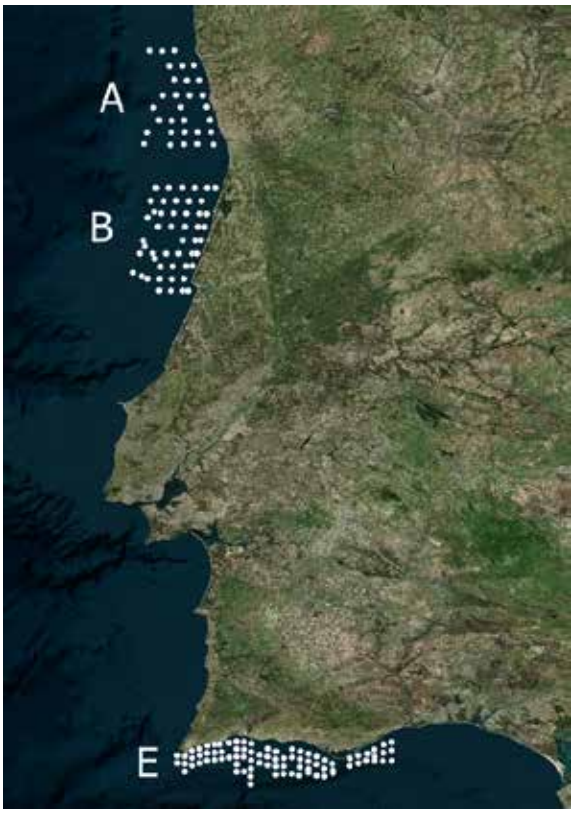


Fig. 1. Mapa das áreas do projeto AQUIMar compreendidas no estudo: A – Porto a Viana do Castelo; B – Aveiro a Figueira da Foz; E – região costeira do Algarve.

As campanhas de colheita de sedimento foram efetuadas a bordo de navios da Marinha Portuguesa, dos quais, o NRP Almirante Gago Coutinho, o NRP Auriga e o NRP Andrómeda, com recurso a um colhedor de sedimento Smith-McIntyre. O sedimento foi armazenado em caixas retangulares de plástico de 2 L e congelados a -26 °C.

2.2. Preparação laboratorial

A preparação laboratorial das amostras consiste em várias etapas: crivagem, liofilização, digestão da matéria orgânica, separação dos microplásticos do sedimento e filtração. A crivagem do sedimento é efetuada com um crivo (Filtra Vibración) de 200 cm de diâmetro e malhagem de 5 mm. A fração retida é descartada enquanto a fração abaixo dos 5 mm é armazenada e congelada, de forma a ser liofilizada (Labconco Lyph-Lock 1L). A liofilização permite-nos obter uma amostra de sedimento seco (ca. 50 g) que será digerida e previne a alienação da solução de digestão pela água presente na amostra prévia à liofilização. Para digerir a matéria orgânica presente na amostra são adicionados 150 mL de solução aquosa de peróxido de hidrogénio (H_2O_2) de 30 volumes [9 % (w/v)], durante 2 a 3 dias. Após o processo de digestão a amostra é novamente crivada com um crivo (marca) de 200 cm de diâmetro e malhagem de 50 µm. A amostra é colocada num recipiente com uma solução salina saturada de cloreto de sódio (NaCl) previamente preparada para separar os microplásticos através da diferença de densidades. A solução repousa durante 1 dia antes de ser filtrada. É feita uma filtração a vácuo do líquido sobrenadante sob um filtro de fibra de vidro (marca) de 47 mm de diâmetro e 1,6 µm de tamanho de poro. A preparação laboratorial termina com a secagem do filtro à temperatura ambiente, num exsicador.

2.3. Procedimento analítico

O procedimento analítico dos filtros provenientes da preparação laboratorial consiste nas análises visual e química. A análise visual é efetuada com recurso a estereomicroscópio (Leica MZ 16 FL III) onde as micropartículas são caracterizadas quanto à cor, forma e dimensão, e isoladas para prosseguirem para a análise química. Esta análise é efetuada através de microscopia FT-IR (Sistema de imagem FT-IR Spotlight 200i com Spectrum Two, PerkinElmer) e consiste na caracterização química da micropartícula de forma a determinar se é um microplástico, i.e. o tipo de polímero (Morgado et al. 2021).

3. RESULTADOS

3.1. Área A

A área de estudo entre o Porto e Viana do Castelo compreendeu 30 estações compreendidas entre os 25 m e os 200 m de profundidade, onde em 9 das quais foram detetados microplásticos. Foram detetados 11 microplásticos e a maior densidade calculada foi 40,01 microplásticos por quilograma de sedimento seco (MP.kg^{-1} DW). De entre os microplásticos encontrados, 55 % apresenta cor azul [Fig. 2. (b)], fragmentos e filmes compõem 91 % das formas encontradas [Fig. 2. (c)], e o polietileno (PE) é o tipo de polímero mais abundante [Fig. 2. (a)].

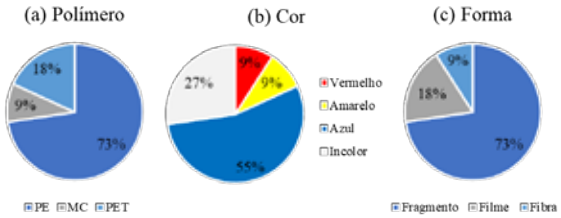


Fig. 2. Resultados da análise da Área A por: (a) tipo de polímero, (b) cor e (c) forma.

3.2. Área B

Na Área B, entre Aveiro e a Figueira da Foz, foram analisados sedimentos de 33 estações, com profundidades a variar entre os 16 m e os 88 m. Destas, foram encontrados microplásticos em 10, num total de 16 microplásticos. A densidade calculada mais elevada foi 81,31 MP.kg^{-1} DW. Nesta área de estudo existe maior variedade de cores em relação à Área A, juntando-se ao azul, partículas incolores, vermelhas e verdes com contribuições significativas [Fig. 3. (b)]. Apesar de se verificar 28 % de fibras, os fragmentos continuam a ser o tipo de

partículas dominante [Fig. 3. (c)]. O PE, o polipropileno (PP) e o politereftalato de etileno são os tipos de polímero que se destacam [Fig. 3. (a)]

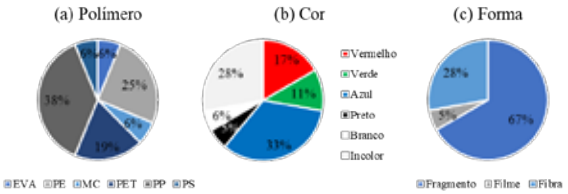


Fig. 3. Resultados da análise da Área B por: (a) tipo de polímero, (b) cor e (c) forma.

3.3. Área E

A região costeira algarvia compreendeu 84 estações com profundidades entre os 30 m e os 260 m. Foram analisados 74 microplásticos distribuídos por 43 estações, ou seja, foram encontrados microplásticos em 51,2 % das amostras de sedimento analisadas. Nesta área de estudo, algumas amostras revelaram densidades acima dos 100 MP.kg^{-1} DW. Os microplásticos incolores representam a maioria (32 %), seguidos de microplásticos azuis, pretos, verdes e vermelhos [Fig. 4. (b)]. Fragmentos e fibras são as formas mais comuns [Fig. 4. (c)]. Apesar de terem sido analisados vários tipos de polímeros, o PE e o PP revelam-se dominantes, num total de 78 % [Fig. 4. (a)].

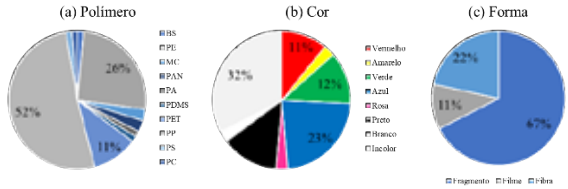


Fig. 4. Resultados da análise da Área E por: (a) tipo de polímero, (b) cor e (c) forma.

4. DISCUSSÃO

Os resultados mostram que, apesar de algumas diferenças entre as três áreas estudadas, há padrões e resultados semelhantes. Partículas azuis e incolores destacam-se como sendo as mais abundantes em todas as regiões estudadas, bem como as partículas em forma de fragmento. Segundo alguns estudos (Suhrhoff et al. 2016), a cor mais utilizada na indústria do plástico são a cor azul e o plástico incolor. Uma vez que a maior parte do plástico nos oceanos é originário de terra, estes resultados replicam com rigor a realidade. Esta realidade é ainda evidenciada por estudos que revelam que os plásticos mais abundantes são o PE e o PP (Morgado et al. 2022). Nas três áreas de estudo, pelo menos um destes polímeros é o mais abundante, com contribuições esmagadoras. Por exemplo, a percentagem conjunta mais baixa do PE e PP é de 63 %. No que respeita à dimensão dos microplásticos analisados, 97 % enquadram-se na categoria dos microplásticos pequenos, especialmente nas categorias determinadas pelos intervalos de 250 µm a 500 µm, inclusive, e 500 µm a 1000 µm, inclusive.

Comparando as áreas de estudo, foram analisados na Área E mais microplásticos por amostra do que nas restantes áreas. Por outro lado, a Área A e a Área B apresentam resultados semelhantes. As duas áreas são contíguas, estão sob condições hidrográficas e oceanográficas semelhantes, e isso pode significar a sua semelhança. A Fig. 5. mostra o indiscutível maior nível de poluição na Área E, com quase o dobro de microplásticos analisados por amostra em relação às restantes áreas.

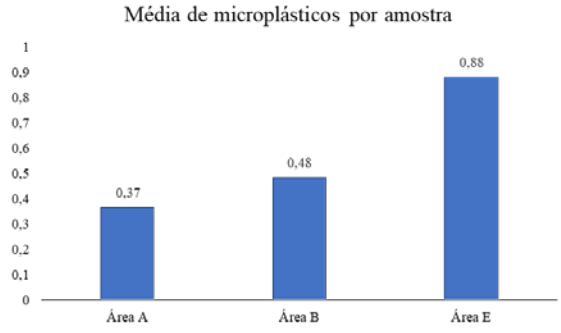


Fig. 5. Média de microplásticos por amostra. Valores mais elevados são indicadores de maior nível de poluição.

Num estudo publicado em 2020, afirmam terem sido encontrados microplásticos em sedimentos marinhos ao longo da costa algarvia (Lechthaler et al. 2020). Neste estudo apenas em 2 de 20 amostras foram detetados microplásticos, onde a densidade mais elevada foi 29 MP.kg^{-1} DW e 0,15 a média de microplásticos por amostra. No Mar do Norte, junto à Plataforma Continental Belga, um estudo de 2011 (Claessens et al., 2011) revela uma densidade média de 97,2 MP.kg^{-1} DW. Outro estudo indica que os resultados sugerem uma distribuição heterogénea dos microplásticos nos sedimentos marinhos (Maes et al. 2017). Revelam também a verificação de uma maior presença de microplásticos em zonas portuárias.

5. CONCLUSÃO

Foram encontrados microplásticos em 62 estações (42 %), confirmando a presença de microplásticos em toda a extensão da costa portuguesa, a grande maioria microplásticos pequenos. Há também evidências da correlação positiva entre a abundância de microplásticos e a atividade humana intensiva e a urbanização, estando em concordância com os resultados e conclusões de vários estudos da comunidade científica. O estudo e monitorização dos microplásticos no oceano tem uma grande importância para o futuro, representando uma importante base de informação que servirá de apoio ao desenvolvimento de metodologias que combatam este tipo de poluição.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pelo Programa Operacional MAR2020, projeto MAR–02.01.01–FEAMP-0107 "AQUIMAR – Caracterização geral das áreas aquícolas para estabelecimentos de culturas marinhas".

Luís Gomes recebeu no período de dezembro de 2018 a janeiro de 2022 uma Bolsa de Investigação no âmbito do projeto AQUIMAR (programa MAR2020).

REFERÊNCIAS

Barbosa, L., Frias, J., Booth, A.M., Vieira, L.R., Masura, J., Baker, J., Foster, G., Guilhermino, L. (2019) Microplastics Pollution in the Marine Environment. In: Charles Sheppard (ed.). *World Seas: An Environmental Evaluation*. Academic Press, London, 329-351.

Claessens, M., De Meester, S., Van Landuyt, L., De Clerck, K., Janssen, C.R. (2011). Occurrence and distribution of microplastics in marine sediments along the Blegian coast. *Marine Polluiton Bulletin*, 62, 2199-2204.

Frias, J. & Nash, R. (2019) Microplastics: finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145-147.

Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. e Xeng, E. Y. (2020). A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2018JC014719.

Lechthaler, S., Schwarzbauer, J., Reicherter, K., Stauch, G., Schüttrumpf, H. (2020). Regional study of microplastics in surface waters and deep sea sediments south of the Algarve Coast. *Regional Studies in Marine Science*, 40, 101488.

Maes, T., Van der Meulen, M. D., Devriese, L. I., Leslie, H. A., Huvet, A., Frère, L., Robbens, J., Vethaak, A. D. (2017). Microplastics Baseline Surveys at the Water Surface and in Sediments of the North-East Atlantic. *Frontiers in Marine Science*, 4, 135.

Morgado, V., Gomes, L., Bettencourt da Silva, R.J.N. e Palma, C. (2021). Validated Spreadsheet for the identification of PE, PET, PP and PS microplastics by micro-ATR-FTIR spectra with known uncertainty. *Talanta*, 234, 122624.

Morgado, V., Gomes, L., Bettencourt da Silva, R.J.N. e Palma, C. (2022). Microplastics contamination in sediments from Portuguese inland waters: Physical-chemical characterisation and distribution. *Science of Total Environment*, 832, 155053.

Suhrhoff, T. J. e Scholz-Böttcher, B. M. (2016) Qualitative impact of salinity, UV radiation and turbulence on leaching of organic plastic additives from four common plastics – A lab experiment. *Marine Pollution Bulletin*, 102, 84-94.

Avaliação metrológica de tendências da composição de áreas oceânicas por simulação Monte Carlo de informação georreferenciada – um caso de estudo

C. Borges (1), C. Palma (1), R. Bettencourt da Silva (2)

(1) IH – Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas 49, Lisboa, Portugal. carlosborges@hidrografico.pt.

(2) CQE@FCUL – Centro de Química Estrutural, Institute of Molecular Sciences, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Resumo: A avaliação de diferenças de composição em áreas oceânicas vastas é altamente dependente de fatores como a sazonalidade, heterogeneidade e dimensão da área de estudo. O presente estudo recorre a simulações de Monte Carlo para modelar a incerteza associada à amostragem numa área oceânica vasta da Plataforma Continental Portuguesa e inferir sobre a função de densidade de probabilidade (fdp) associada à estimativa do valor médio dos parâmetros nitrato+nitrito e condutividade e apresenta uma metodologia de comparação de estimativas dos referidos parâmetros, obtidas em condições sazonais distintas. Os resultados obtidos, mesmo quando se verifica que as distribuições de concentração simuladas não seguem uma fdp "bem comportada" e se sobrepõem para os dois períodos em análise, permitem concluir que as diferenças de composição determinadas para ambos os parâmetros, afetadas da incerteza de amostragem, são significativas, usando como critério que dois valores médios são significativamente diferentes se o valor zero não se encontrar entre os 0,5º e 99,5º percentis da simulação Monte Carlo da diferença das médias.

Palavras-chave: águas oceânicas, incerteza da amostragem, simulações de Monte Carlo.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação do estado ambiental e o estudo de diferenças de composição de áreas oceânicas vastas é altamente dependente de fatores como a sazonalidade, heterogeneidade e dimensão da área de estudo. A estes fatores acresce a influência da amostragem na incerteza associada ao resultado produzido, incerteza esta que é também influenciada pelo erro associado ao posicionamento do ponto de colheita. A influência da amostragem no resultado final duma medição é de tal modo significativa que, mesmo em sistemas menos heterogéneos que o meio marinho, a amostragem pode ser responsável por até 90% da incerteza total da medição (Botta et al., 2012). Assim, qualquer estudo do estado ambiental, seja ele de avaliação pontual ou de evolução temporal de um sistema, deverá sempre considerar a componente da amostragem e não apenas a componente analítica.

Recentemente, foi desenvolvida uma ferramenta implementada numa folha Excel (Borges *et al.*, 2019; Borges *et al.*, 2021) que permite a modelação e otimização da incerteza da amostragem recorrendo ao Método de Monte Carlo (MCM), por simulação de diferentes estratégias de amostragem. A aplicação de simulações MCM tem-se mostrado uma ferramenta útil para modelar a incerteza associada à amostragem e inferir sobre a função de densidade de probabilidade (fdp) associada à estimativa do valor médio do parâmetro determinado. Quando esta fdp não segue um comportamento normal, a avaliação de diferenças de composição em períodos distintos deve ter em conta a sua complexidade. A referida ferramenta, desenvolvida especificamente para o meio marinho, em que o posicionamento é um fator relevante, foi aplicada com sucesso à avaliação da evolução temporal de nutrientes no estuário do Rio Tejo (Borges *et al.*, 2020), tendo também já sido aplicada a outros sistemas complexos em que o posicionamento é um fator de incerteza. (Ramsey *et al.*, 2022). A ferramenta, bem como a explicação detalhada da mesma, pode ser consultada em Borges *et al.* (2019).

O presente estudo modela e otimiza a incerteza de amostragem no meio marinho, aplicada ao caso particular dos parâmetros nitrato+nitrito (NO_x) e condutividade, recorrendo à estratégia de amostragem *Single Sampling* (cf. Borges *et al.*, 2019) em duas situações temporais distintas. A partir dos dados simulados obtidos são avaliadas as diferenças de concentração entre os dois períodos de amostragem e se as mesmas são significativas.

2. MÉTODOS

2.1. Colheita

As amostras foram colhidas na plataforma continental portuguesa durante os cruzeiros IHPT-AQUIMAR2018-2 (Out2018) e IHPT-AQUIMAR2019-2 (Mai2019), realizados no âmbito dos trabalhos do Projeto AQUIMAR (Caraterização geral de áreas AQUIcolas para estabelecimento de culturas MARinhas/*Marine Knowledge supporting Aquaculture*). Para este estudo em particular, foram

colhidas 20 amostras de água numa grelha de aproximadamente 20 x 15 milhas náuticas, a uma distância de 5 milhas náuticas entre si, à profundidade selecionada de 25 m (*Fig. 1*). Em simultâneo, foram adquiridos, entre outros, dados de condutividade com recurso a sensor calibrado montado num perfilador de CTD Idronaut Ocean Seven 320Plus.

Após colheita, as amostras foram filtradas usando filtros de polietersulfona com 0,45 µm de tamanho de poro e preservadas por congelação a temperatura inferior a -18ºC até à análise.

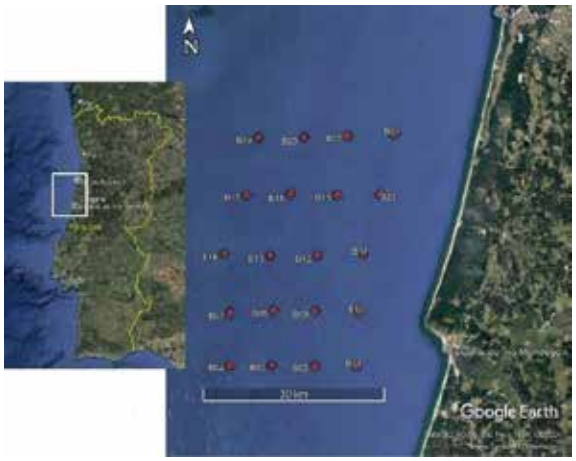


Fig. 1. Estações de amostragem de água (B01 a B24) efetuadas a 25 m de profundidade, em duas ocasiões (outubro de 2018 e maio de 2019), implantadas sobre imagens do Google Earth. Para cada estação, a diferença de posicionamento entre ocasiões de amostragem não foi superior a 300 m e é indistinguível na escala apresentada..

2.2. Análise

A determinação da concentração de NO_x nas amostras foi efetuada por espectroscopia UV/vis utilizando o método colorimétrico específico desenvolvido por Strickland e Parsons (1972), implementado num Analisador de Fluxo Segmentado Skalar SANplus especialmente projetado para a análise de águas salinas.

Na Tabela I encontra-se compilada a informação referente à incerteza analítica total, *U*, dos métodos de determinação do NO_x, e da condutividade. Esta incerteza é calculada para um grau de confiança de aproximadamente 95% e fator de expansão $k = 2$.

Tabela I - Desempenho analítico dos métodos de determinação do NO_x e condutividade. U_A e U'_A – incerteza analítica expandida, absoluta e relativa, respetivamente, para um grau de confiança de aproximadamente 95% e fator de expansão $k = 2$.

Parâmetro	Intervalo	Incerteza Analítica Expandida
NOx (µmol L^{-1})	[0,067 a 0,400]	U_A = 0,065 µmol L^{-1}
	[≥0,400]	U'_A = 8.0 %
condutividade (mS cm^{-1})	[30 a 50]	U_A = 0,0031 mS cm^{-1}

Informação mais detalhada sobre o desempenho analítico do NO_x pode ser consultada na Tabela S2 de Borges *et al.* (2019).

2.3. Modelação

Assumindo que os valores dos parâmetros estudados (NO_x e condutividade) na área de estudo apresentam uma distribuição normal, quando aplicada a estratégia de amostragem *Single Sampling*, a sua dispersão pode ser quantificada pelo desvio padrão de *n* valores medidos ou estimados por modelação, s_S, que possui uma componente relativa à variabilidade intrínseca do parâmetro nas amostras, s_V, e à repetibilidade da medição, s_r (proveniente da componente analítica, Equação (1)):

$$s_V = \sqrt{s_S^2 - s_r^2} \qquad (1)$$

A incerteza padrão da medição é estimada por combinação das diferentes componentes da incerteza, que é dada pela equação (2) na sua forma absoluta,.

$$u = \sqrt{s_V^2 + s_r^2 + s_I^2 + u_T^2} \qquad (2)$$

em que s_V corresponde à incerteza padrão da variabilidade de composição do sistema, s_r e s_I os desvios padrão de repetibilidade e de precisão intermédia de medição, respetivamente, e u_T à incerteza padrão de veracidade.

Esta equação pode ser apresentada de modo simplificado, pela equação (3), também na sua forma absoluta, em que u_A corresponde à incerteza padrão analítica:

$$u = \sqrt{s_V^2 + u_A^2}, \text{ com } u_A = \sqrt{s_r^2 + s_I^2 + u_T^2} \qquad (3)$$

2.4. Metodologia de comparação

A metodologia de comparação apresentada calcula a diferença das simulações de Monte Carlo efetuadas para os dois períodos de amostragem e define que diferenças de composição, afetadas da incerteza de amostragem, são significativas apenas se o valor zero não estiver contido no intervalo de confiança da simulação de Monte Carlo da diferença das médias.

De modo a assegurar que a probabilidade de assumir falsamente que duas concentrações médias são diferentes não é superior a 1%, esta avaliação é realizada para um grau de confiança de 99%,

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela II apresenta as concentrações médias estimadas de NOx, e condutividade simuladas pelo MCM para a estratégia de amostragem *Single Sampling* na área de estudo para os dois períodos de amostragem. São também apresentadas as diversas componentes que contribuem para a incerteza total, *U*, nomeadamente a incerteza padrão de amostragem, s_V, e a incerteza padrão analítica, u_A. A dimensão do conjunto de dados simulados, *n*, variou, para os parâmetros e períodos em análise, entre 2579 e 2936. A Figura 2 apresenta a distribuição da concentração

simulada obtida para a referida estratégia de amostragem nos mesmos períodos.

A partir dos dados apresentados na Tabela II, são definidos os intervalos de confiança das medições, constantes da Tabela III, sendo expectável que os intervalos de confiança apresentados incluam o valor "verdadeiro" dos parâmetros medidos, com um grau de confiança de 95%.

Tabela II – Variabilidade simulada do valor dos parâmetros em estudo nos dois períodos de amostragem, incertezas padrão de amostragem (s_V), analítica (u_A) e combinada (u) e incerteza expandida (U, k = 2, para um grau de confiança de aproximadamente 95%) por aplicação da estratégia de amostragem *Single Sampling* (SS). (§ - Valor obtido pelo Método de Monte Carlo)

Parâmetro	Out2018					Mai2019				
	Média §	s_V §	u_A	u	U	Média §	s_V §	u_A	u	U
NO_x (µmol L^{-1})	1,18	0,411	0,033	0,412	0,82	0.79	0,450	0,063	0,455	0,91
condutividade (mS cm^{-1})	45,56	0,2825	0.0014	0,283	0,57	43,37	0,2654	0,0017	0,265	0,53

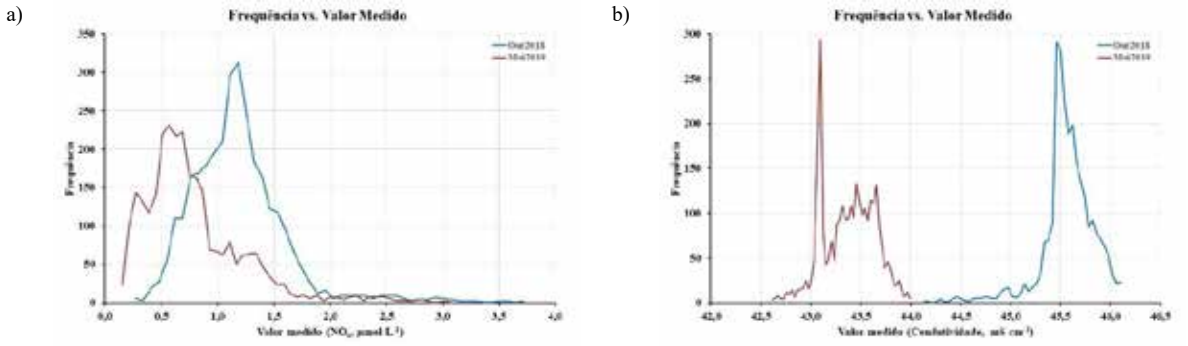


Fig. 2: Distribuição da concentração simulada dos parâmetros em estudo na área de estudo para os dois períodos de amostragem: a) NO_x; b) Condutividade.

Tabela III – Concentração média dos parâmetros em estudo para os dois períodos em análise, reportada com incerteza para um grau de confiança de aproximadamente 95% e fator de expansão k = 2.

Parâmetro	Concentração	
	Out2018	Mai2019
NOx	1,18 ± 0,82 µmol L^{-1}	0,789 ± 0,910 µmol L^{-1}
condutividade	45,56 ± 0,57 mS cm^{-1}	43,37 ± 0,53 mS cm^{-1}

Da análise dos dados das Tabelas II e III, bem como da Figura 2, é de realçar desde logo o seguinte:

- O maior contributo para a incerteza é proveniente da componente de amostragem (s_V); no entanto, a aplicação de outras estratégias de amostragem permite definir medidas de otimização desta componente da incerteza, que permitem a sua redução em até cerca de 50% (Borges *et al.*, 2021);
- A distribuição de concentração simulada dos parâmetros em estudo não se ajusta a uma fdp dita "bem comportada" (p.e., normal ou log-normal), sendo o caso mais típico de desvio o apresentado pela distribuição da concentração simulada de NO_x em Mai2019;
- A sobreposição de distribuição de concentrações simuladas de NO_x parece indiciar que a diferença de composição não é significativa
- Ao contrário, para a condutividade, para além de não se observar sobreposição da distribuição de concentrações, verifica-se uma grande homogeneidade das referidas distribuições em cada período de amostragem, da ordem de 0,5-0,6 mS cm^{-1}, com um grau de confiança de aproximadamente 95%.

No entanto, apesar das distribuições de concentração simuladas não se assemelharem a uma fdp normal, é uma característica bem conhecida que a diferença entre duas fdp se aproxima da distribuição normal. Isto mesmo é demonstrado pelas representações constantes da Figura 3, que apresentam a distribuição da diferença de concentração de NO_x e condutividade entre os dois períodos de amostragem.

A mesma figura apresenta ainda os percentis de distribuição P2,5 e P97,5 (correspondentes a uma probabilidade de 95% da diferença se encontrar no intervalo definido por aqueles percentis) e P0,5 e P99,5 (correspondentes a uma probabilidade de 99% de a diferença se encontrar no intervalo definido por aqueles percentis).

Analisando as representações constantes da Figura 3, pode-se, desde logo, afirmar o seguinte:

- A distribuição das diferenças de concentração aproxima-se da fdp normal; no entanto, esta é apenas uma aproximação à fdp normal, uma vez que os pares de percentis recíprocos (P0,5 e P99,5 ou P2,5 e P97,5) não se encontram equidistantes do 50º percentil (denotado por P50);

- Para ambos os parâmetros, e para um grau de confiança de 99%, o valor zero não está contido no intervalo de confiança da simulação de Monte Carlo da diferença das médias;

a) b)

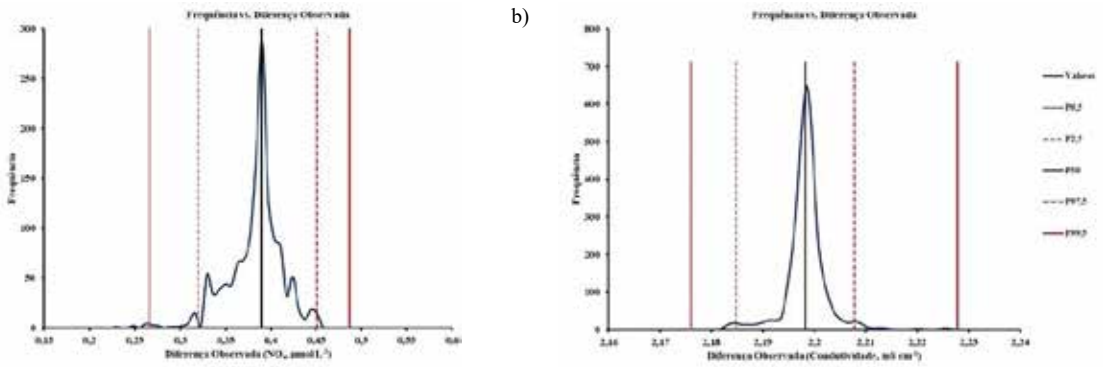


Fig. 3: Distribuição da diferença de concentração dos parâmetros em estudo entre os dois períodos de amostragem na área de estudo: a) NO_x; b) Condutividade. São também apresentados os percentis de distribuição 0,5, P0,5, 2,5, P2,5, 97,5, P97,5, e 99,5, P99,5.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que a incerteza da amostragem é o principal contributo para a incerteza global da medição.

Pode-se ainda concluir que, para ambos os parâmetros em estudo, NO_x e condutividade, foram identificadas diferenças de composição significativas entre os dois períodos de amostragem, com um grau de confiança de 99%.

Em resumo, pode-se concluir que a metodologia apresentada permite identificar, de forma inequívoca e metrologicamente fundamentada, a existência de diferenças de valores dos parâmetros estudados entre períodos de amostragem distintos.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do Programa Operacional Mar 2020, Projeto AQUIMAR. (MAR-02-01-01-FEAMP-0107). R.J.N Bettencourt da Silva foi também financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), através dos projetos UIDB/00100/2020 e UIDP/00100/2020.

Os autores agradecem também à equipa técnica do IH e tripulações dos NRP "Alm. Gago Coutinho" e NRP "D. Carlos I", pois sem o seu empenho e espírito de missão, este trabalho não seria possível.

REFERÊNCIAS

Bettencourt da Silva, R.J.N., Argyraki, A., Borges, C., Palma, C., Ramsey, M.H. (2022). Spatial Modelling of Concentration in Topsoil Using Random and Systematic Uncertainty Components: Comparison against Established Techniques, Analytical Letters https://doi.org/10.1080/00032719.2022.2050383

Borges, C., Palma, C., Bettencourt da Silva, R.J.N. (2019). Optimization of river sampling: application to nutrients distribution in Tagus river estuary, *Analytical Chemistry*. 91, 5698-5705. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b05781

Borges, C., Palma, C., Bettencourt da Silva, R.J.N. (2020). Determination of river water composition trends with uncertainty: Seasonal variation of nutrients concentration in Tagus river estuary in the dry 2017 year, *Marine Pollution Bulletin*, 158, 111371. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111371

Borges, C., Palma, C., Dadamos, T., Bettencourt da Silva, R.J.N. (2021). Evaluation of seawater composition in a vast area from the Monte Carlo Simulation of georeferenced information in a Bayesian framework, Chemosphere, 263, 128036. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128036

Botta, F., Lepot, B., Leoz-Garziandia, E., Morin, A. (2012). Estimation of sampling uncertainty in lake-water monitoring in a collaborative field trial. *Trends in Analytical Chemistry*, 36, 176-184.

Strickland, J. D. H., e Parsons, T. R. (1972). *A Practical Handbook of Seawater Analysis*, Fisheries Research Board of Canada: Ottawa, Canada, 328 pp.

Caraterização das massas de água das áreas da plataforma continental Portuguesa com potencial aquícola

C. Gonçalves (1), M. Santos (1), L. Gomes (1), A. Batista (1), C. Borges (1), C. Palma (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. celia.macedo@hidrografico.pt.

Resumo: O projeto AQUIMAR pretende identificar os locais com maior aptidão para prática da aquicultura na zona costeira Portuguesa, com base na caraterização das condições oceanográficas, geoquímicas e biológicas das áreas de estudo. Assim, foram efetuadas quatro campanhas oceanográficas entre 2018 e 2020 em cinco áreas da Plataforma Continental portuguesa com colheitas de amostras de água a diferentes níveis de profundidade para a determinação de diversos parâmetros clássicos, biológicos, nutrientes e metais. A determinação dos parâmetros clássicos, biológicos e nutrientes irão permitir definir áreas preferenciais de implementação de diferentes tipos de culturas marinhas enquanto a determinação de metais permitirá caraterizar as áreas em termos de poluição nestes parâmetros. Neste trabalho apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos nas quatro campanhas efetuadas para os nutrientes e metais, sendo os resultados comparados com normas de qualidade ambiental.

Palavras-chave: coluna de água, metais pesados, nutrientes, plataforma continental Portuguesa.

1. INTRODUÇÃO

A aquicultura constitui um importante complemento das formas tradicionais de abastecimento de pescado permitindo satisfazer as necessidades de pescado para uma população mundial em crescimento, reduzindo a captura de recursos selvagens. O Plano Estratégico para a Aquicultura Portuguesa (2014-2020) (PEAP, 2015) identifica a aquicultura como uma área de intervenção prioritária e com um forte potencial de crescimento nos próximos anos, sobretudo no que concerne à exploração de novas áreas de produção em mar aberto, perspetivando um aumento da capacidade produtiva de 25 mil toneladas até 2023.

O projeto AQUIMAR "Caraterização geral de áreas aquícolas para estabelecimento de culturas marinhas" tem como principal objetivo a recolha de informação técnica e científica com vista a aumentar o conhecimento sobre as caraterísticas oceanográficas (e.g. nutrientes), geoquímicas (e.g. metais) e biológicas (e.g. produção primária) da zona costeira Portuguesa. Este conhecimento é necessário para a identificação dos locais com maior aptidão para a prática da aquicultura, tendo por base as áreas já delimitadas no Plano de Ordenamento do Espaço Marítimo (aquicultura potencial) (POEM 2014-2020).

A contaminação de ambientes aquáticos por metais pesados provenientes de fontes naturais ou antropogénicas, tem recebido especial atenção devido à sua toxicidade, abundância, persistência no ambiente e posterior bioacumulação em organismos marinhos através da cadeia trófica. Metais essenciais como o cobre (Cu), zinco (Zn), crómio (Cr), níquel (Ni), ferro (Fe) e manganês (Mn) são necessários para a atividade enzimática e biológica, podendo ser prejudiciais quando os níveis excedem os limites de toxicidade; metais não essenciais como o alumínio (Al), cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb) e o semi-metal arsénio (As), não possuem funções biológicas conhecidas e podem ser tóxicos mesmo a baixos níveis (Diretiva 2013/39/EU).

Os nutrientes, como a amónia (NH_4), nitrato (NO_3), nitrito (NO_2) e fosfato (PO_4), desempenham um papel fundamental na determinação do estado ecológico dos sistemas aquáticos. Apesar do seu papel fundamental na produção primária, é reconhecido que o excesso destes nutrientes pode provocar a eutrofização dos sistemas, com o aparecimento de efeitos adversos, tais como deficiência de oxigénio, degradação dos ecossistemas e perda de biodiversidade.

A avaliação do estado de contaminação do meio marinho por metais, pode ser efetuada através da comparação dos resultados com as Normas de Qualidade da Água (NQA) para as substâncias prioritárias e "outros poluentes" no domínio da política da água (DL n.º 218/2015). No mesmo documento são ainda definidas, para "outras águas superficiais" (águas de transição, costeiras e territoriais), valores médios anuais (NQA-MA), para proteção contra a exposição a longo prazo e concentrações máximas admissíveis (NQA-CMA), para proteção contra a exposição a curto prazo. A Convenção OSPAR também estabelece valores de referência que permitem avaliar a qualidade do ambiente marinho para as diferentes matrizes água, sedimento e biota. Para a matriz água, o parâmetro *Environmental Assessment Criteria* – EAC – valor de concentração da substância que não cause efeitos crónicos em espécies marinhas ou no ambiente, é utilizado para avaliar a concentração de metais.

O enriquecimento em nutrientes nas águas costeiras, até uma profundidade de cerca de 100 m, tem por base

as descargas dos rios e dos emissários submarinos, estando, portanto, sujeitas a impactos diretos das atividades humanas. Já as águas oceânicas, por não estarem sujeitas diretamente aos impactes das atividades humanas, são apenas influenciadas pelo estado das águas costeiras adjacentes. Os valores-limite de azoto inorgânico dissolvido (DIN) para as áreas definidas na subdivisão do Continente encontram-se descritos em MAMAOT (2012).

2. METODOLOGIA

2.1. Amostragem

Entre outubro de 2018 e março de 2020 foram realizadas quatro campanhas oceanográficas para colheita de águas (Tabela I), em cinco áreas de amostragem (entre Viana do Castelo e Porto (A), entre Aveiro e Figueira da Foz (B), ao largo de Peniche (C), entre Setúbal e Sines (D) e entre Tavira e Sagres (E)), tendo como base o Plano de Ordenamento do Espaço Marítimo (aquicultura potencial) (Fig.1).

Tabela I – Campanhas AQUIMAR oceânicas para colheita de amostras de águas, realizadas em 2018, 2019 e 2020.

Campanha	AQUIMAR2018-2	AQUIMAR2019-2	AQUIMAR2019-4	AQUIMAR2020-1
Data	05-10 a 27-10-2018	16-04 a 13-05-2019	07-10 a 31-10-2019	24-02 a 20-03-2020
Área (Nº amostras)	A (195), B (264), C (51), D (92), E (230)	A (181), B (237), C (76), D (98), E (218)	A (199), B (266), C (71), D (98), E (237)	A (50), B (61), C (36), D (44), E (120)



*Fig. 1 – Mapa da área de estudo com a localização das áreas de amostragem: **A** - Viana do Castelo a Porto; **B** - Aveiro a Figueira da Foz; **C** - Peniche; **D** - Setúbal a Sines; **E** - Tavira a Sagres.*

A amostragem foi realizada com recurso a garrafas *Niskin* acopladas a um sistema de CTD/Rosette (Ocean Seven 320Plus WOCE-CTD/General Oceanics). Após filtração com filtros de policarbonato de porosidade 0,45 µm as amostras para determinação de metais foram conservadas com adição de ácido nítrico até pH< 2 e as amostras para determinação de nutrientes foram preservadas a -18 ºC, até análise laboratorial.

2.2. Análise laboratorial

A análise dos metais foi efetuada por espectrometria de absorção atómica (EAA) com chama (Cu, Fe, Zn), câmara de grafite (Cd, Pb, Ni) ou gerador de hidretos (As), com base em metodologias descritas em Vandecasteele e Block (1993), adaptadas à análise de águas salinas.

A análise de nutrientes foi efetuada por espectroscopia UV/vis num Analisador de Fluxo Segmentado Skalar SANplus especialmente projetado para a análise de águas salinas, tendo-se usado, no caso particular do NO_x (NO_3+NO_2), uma adaptação do método desenvolvido por Strickland e Parsons (1972).

3. RESULTADOS e DISCUSSÃO:

3.1. Metais pesados

Na Figura 2 estão representados os dados de concentração de As obtidos à superfície e fundo da coluna de água, nas 4 campanhas efetuadas.

Os padrões de variação das medianas de As mostram valores de As de fundo superiores aos de superfície, em consequência da decomposição da matéria orgânica e libertação para o sistema. Não foi identificada a existência de variabilidade espacial, com valores de mediana de 1,4 µg/L (áreas B e C) e de 1,5 µg/L (restantes áreas), variando as concentrações entre o mínimo de ≤1,0 (LQ), em que LQ é o Limite de Quantificação, e o máximo de 3,5 µg/L. Também não foi verificada a ocorrência de variabilidade sazonal, sendo os valores de mediana de As de ~1,4 µg/L nas 4 campanhas realizadas.

Na Tabela II, apresentam-se resultados de concentração de metais, em termos de média, mínimo-máximo e os valores de referência OSPAR (EAC) e NQA.

Considerando os valores de EAC, verifica-se que os valores médios de metais obtidos nas cinco áreas se encontram abaixo dos limites superiores EAC, com exceção do Cu. Os valores máximos de concentração dos metais Cu, Cd, Ni e Pb encontram-se acima desses mesmos limites superiores EAC. Com base no DL n.º 218/2015 para os metais Cd, Ni e Pb, verifica-se que os valores médios se encontram abaixo dos limites NQA-MA. Relativamente aos valores

máximos alguns metais ultrapassam, em algumas áreas esse limite (Pb- áreas C, D e E; Ni – área D; Pb – área E). Tendo em consideração os limites NQA-CMA, os resultados obtidos dos metais Cd, Ni e Pb estão abaixo desses limites.

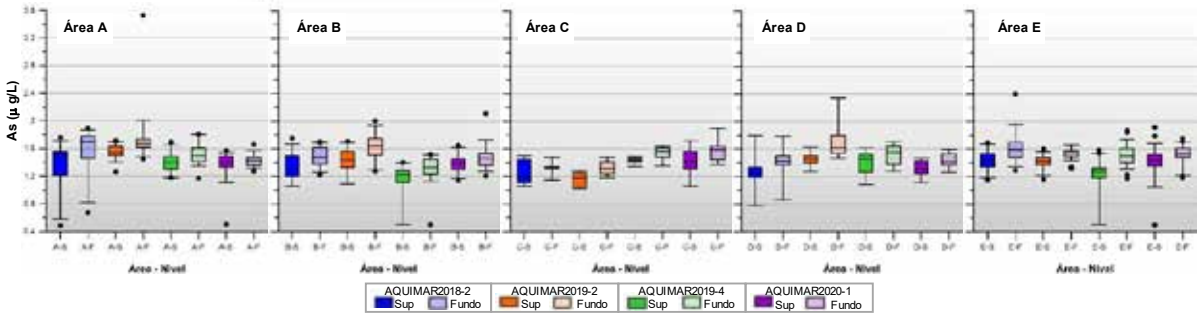


*Fig. 2 Concentração de As na coluna de água. **Área** – **Nível**: área da zona costeira (A a E) ao nível de profundidade superfície (S) ou fundo (F) (▬): mediana; (┴): percentil 5; (┬): percentil 95.*

Tabela II – Resultados de metais na coluna de água e valores de referência EAC (OSPAR, 2008) e NQA (Diretiva 2013/39/EU). (b) Dureza da água classe 5. (p) valores provisórios. x̄: média; m: mínimo; M: máximo; ≤ indica o LQ do respetivo método de ensaio.

	Área A x̄ (m–M)	Área B x̄ (m–M)	Área C x̄ (m–M)	Área D x̄ (m–M)	Área E x̄ (m–M)	EAC (µg/L)	NQA-MA (µg/L)	NQA-CMA (µg/L)
As (µg/L)	**1,5** (≤1,0–3,5)	**1,4** (≤1,0–2,1)	**1,4** (≤1,0–1,9)	**1,4** (≤1,0–2,3)	**1,4** (≤1,0–2,4)	**1–10**	—	—
Cu (µg/L)	**≤1,0** (≤1,0–2,7)	**≤1,0** (≤1,0– 3,8)	**1,1** (≤1,0–2,2)	**≤1,0** (≤1,0–5,1)	**≤1,0** (≤1,0– 7,2)	**0,005–0,05**	—	—
Cd (µg/L)	**≤0,5** (≤0,5–0,2)	**≤0,5** (≤0,5–0,2)	**≤0,5** (≤0,5–0,3)	**≤0,5** (≤0,5–0,3)	**≤0,5** (≤0,5–0,5)	**0,01–0,1**	**0,2**	**1,5**[(b)]
Fe (µg/L)	**2,6** (≤2,0–9,1)	**3,0** (2,0–35)	**5,3** (≤2,0–17)	**3,1** (≤2,0–15)	**3,7** (≤2,0–78)	—	—	—
Ni (µg/L)	**0,42** (0,15–1,3)	**0,46** (0,17–4,4)	**0,44** (0,20–1,8)	**0,66** (0,18–12)	**0,56** (0,11–3,2)	**0,1–1**[(p)]	**8,6**	**34**
Pb (µg/L)	**≤0,5** (≤0,5–0,54)	**≤0,5** (≤0,5–0,60)	**≤0,5** (≤0,5–0,62)	**≤0,5** (≤0,5–0,51)	**≤0,5** (≤0,5–2,8)	**0,5–5**	**1,3**	**14**
Zn (µg/L)	**1,8** (≤1,0–8,1)	**2,1** (≤1,0–22)	**3,6** (≤1,0–16)	**3,1** (≤1,0–14)	**2,5** (≤1,0–13)	**0,5–5**	—	—

3.2. Nutrientes

Como se pode observar na Figura 3, que apresenta os dados de concentração de NO_x nas cinco áreas amostradas, o padrão de distribuição da concentração de NO_x mostra estratificação da coluna de água, observando-se um gradiente positivo da superfície para o fundo, gradiente este que é típico de massas de água oceânica. Este padrão repete-se em todas as áreas e períodos de estudo sendo menos acentuado na área A - AQUIMAR2020-1, podendo estar relacionado com um maior grau de mistura da coluna de água (i.e., um menor grau de estratificação).

Relativamente à distribuição espacial de NO_x, verifica-se que a área E apresentou maior amplitude de valores (1,9 a 19 µmol/L), seguindo-se as áreas A (6 a 17 µmol/L), B, (3,7 a 13 µmol/L), D (2,0 a 10,4 µmol/L) e C (4,1 a 9,7 µmol/L), estando esta dispersão diretamente relacionada com a dimensão das diferentes áreas.

No que se refere à avaliação da existência de variabilidade temporal nas concentrações de NO_x, a mesma não é apresentada no presente estudo, estando integrada num estudo mais vasto, em preparação.

Na Tabela III, apresentam-se resultados de NO_x, em termos de média e mínimo-máximo e os valores de referência (VR) e valores-limite (VL) definidos em MAMAOT (2012) para azoto inorgânico dissolvido (DIN = NO_x+NH_4).

Com base na metodologia de avaliação definida naquele documento, verifica-se que os valores médios de NO_x (aqui usado como *proxy* de DIN, uma vez que os teores de NH_4 se situaram sistematicamente abaixo do LQ do método) se encontram abaixo dos limites VR definidos para DIN, em todas as áreas e períodos de estudo.

Tabela III – Resultados de DIN (µmol/L) e valores de referência (VR) e limite (VL) (µmol/L) para águas marinhas (MAMAOT, 2012). x̄: média; m: mínimo; M: máximo. ≤ indica o Limite de Quantificação do respetivo método de ensaio.

	Campanha	Área A x̄ (m – M)	Área B x̄ (m – M))	Área C x̄ (m – M)	Área D x̄ (m – M)	Área E x̄ (m – M)	VR (µmol/L)	VL (µmol/L)
DIN (µmol/L)	AQUIMAR2018-2	**5,7** (≤0,5 – 17,0)	**4,4** (≤0,5 – 11,6)	**3,1** (≤0,5 – 9,7)	**2,8** (≤0,5 – 9,7)	**3,1** (≤0,5 – 12,8)	**8**	**12**
	AQUIMAR2019-2	**5,3** (≤0,5 – 10,7)	**3,8** (≤0,5 – 11,1)	**3,4** (≤0,5 – 9,7)	**3,8** (≤0,5 – 10,4)	**5,4** (≤0,5 – 19,0)		
	AQUIMAR2019-4	**7,1** (≤0,5 – 14,6)	**4,7** (≤0,5 – 13,1)	**3,5** (≤0,5 – 8,8)	**3,6** (≤0,5 – 8,6)	**4,7** (≤0,5 – 11,3)		
	AQUIMAR2020-2	**6,2** (≤0,5 – 12,3)	**3,3** (≤0,5 – 9,1)	**4,8** (≤0,5 – 9,9)	**3,5** (≤0,5 – 7,9)	**3,2** (≤0,5 – 13,6)		

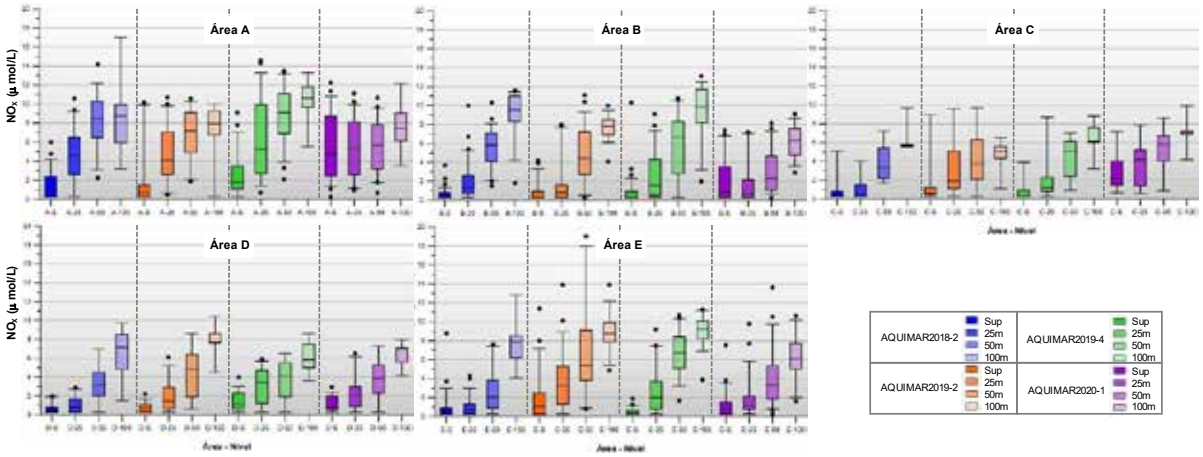


Fig. 3 – Concentração de NOx. ***Área – Nível:*** *área da zona costeira (**A** a **E**) a um determinado nível de profundidade da coluna de água; (━): mediana; (⊥): percentil 5; (┬): percentil 95.*

4. CONCLUSÃO:

De acordo com os resultados obtidos, pode-se afirmar que as áreas estudadas não apresentam problemas relativos com a contaminação com As, uma vez que os valores determinados no período em análise se encontram sistematicamente abaixo dos valores limite considerados (EAC, NQA-MA e NQA-CMA).

No que se refere aos teores de NO_x, e como estes também não ultrapassam os valores limite definidos (VR), pode-se concluir que as áreas em estudo não se encontram sujeitas a fenómenos de eutrofização causados por este nutriente.

No entanto, realça-se que uma avaliação mais aprofundada destes fenómenos (contaminação e eutrofização) deverá considerar o efeito de outros metais e nutrientes.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pelo Programa Operacional MAR2020, projeto MAR–02.01.01–FEAMP-0107 "AQUIMAR – Caracterização geral das áreas aquícolas para estabelecimentos de culturas marinhas".

Marta Rico recebeu no período de janeiro de 2019 a junho de 2021 uma Bolsa de Investigação no âmbito do projeto AQUIMAR (programa MAR2020).

REFERÊNCIAS

C. Vandecasteele e C.B. Block, *Modern Methods for Trace Element Determination*, John Wiley & Sons, 1993, 344 pp.

Decreto-Lei nº 218/2015 (2015). *Diário da República*, 1.ª série, 196, 8667-8685.

Diretiva 2013/39/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 12 de Agosto de 2013 que altera as diretivas 2000/60/CE e 2008/105/CE no que respeita às substâncias prioritárias no domínio da política da água. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, L 226 (2013), 1-17.

MAMAOT (2012). *Estratégia Marinha para a subdivisão do Continente. Diretiva-Quadro "Estratégia Marinha"*. Ministério da Agricultura do Mar do Ambiente e do Ordenamento do Território, Portugal, 906 pp.

OSPAR (2008). *2007/2008 CEMP Assessment - Trends and concentrations of selected hazardous substances in the marine environment.* OSPAR Commission, 378/2008, 7-16.

OSPAR (2014). *Levels and trends in marine contaminants and their biological effects - CEMP Assessment Report 2013.* OSPAR Commission, 631/2014, 20-21.

PEAP (2015). *Plano Estratégico para a Aquicultura Portuguesa 2014-2020*. Governo de Portugal, 96 pp.

POEM (2014-2020). *Plano Estratégico para a aquicultura Portuguesa 2014-2020*. Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos. Ministério da Agricultura e do Mar. Governo de Portugal, 90 pp.

Strickland, J. e Parsons, T. (1972). *A Practical Handbook of Seawater Analysis.* Fisheries Research Board of Canada Bulletin, 157, 2nd Edition, 310 pp.

Caraterização geoquímica das áreas da plataforma continental portuguesa com potencial aquícola

C. Gonçalves (1), M. Santos (1), R. Santos (1), G. Gomes (1), A. Batista (1), A. Oliveira (1), C. Palma (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. celia.macedo@hidrografico.pt

Resumo: O projeto AQUIMAR - Caraterização geral de áreas AQUIcolas para estabelecimento de culturas MARinhas pretende identificar os locais com maior aptidão para prática da aquicultura na zona costeira Portuguesa, com base na caraterização das condições oceanográficas, geoquímicas e biológicas das áreas de estudo. Foram efetuadas campanhas oceanográficas no período 2018 – 2020 em cinco áreas da Plataforma Continental portuguesa e em quatro áreas de águas interiores (rio Mira e rio Mondego; ria Formosa e ria de Aveiro) com colheitas de amostras de sedimento para a determinação de parâmetros sedimentológicos e metais. A avaliação geoquímica dos sedimentos permite caraterizar as áreas em termos de poluição antropogénica e possíveis fontes. Apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos nas campanhas efetuadas para os parâmetros acima referidos, sendo os resultados comparados com normas de qualidade ambiental e com valores de referência.

Palavras-chave: granulometria, metais pesados, Plataforma Continental Portuguesa.

1. INTRODUÇÃO

O Plano Estratégico para a Aquicultura Portuguesa (2014-2020) (PEAP, 2015), pretende contribuir de uma forma ativa para o desenvolvimento de uma aquicultura sustentável em termos ambientais e de biodiversidade. É fundamental que as diversas áreas aquícolas tenham uma caraterização inicial em termos de condições oceanográficas, físico-químicas, geoquímicas e biológicas da zona costeira portuguesa, tendo surgido o projeto AQUIMAR com o objetivo de efetuar essa caraterização inicial.

Os metais pesados são poluentes importantes no ambiente aquático devido à sua elevada toxicidade, persistência e bioacumulação. Apesar das descargas antropogénicas de metais terem diminuído significativamente, ainda podem ser encontrados em concentrações elevadas nos sedimentos, em particular em zonas mais interiores, nomeadamente estuários e rios. A granulometria dos sedimentos influência os teores de metais, pelo que o estudo da percentagem de silte e argila permite corrigir a variabilidade textural do sedimento. Pretende-se com este trabalho estudar a distribuição de metais pesados, associado com a granulometria dos sedimentos em cinco áreas costeiras oceânicas ao longo da costa portuguesa e em quatro zonas interiores de Portugal continental, nomeadamente ria de Aveiro, rio Mondego, rio Mira e ria Formosa. A avaliação do estado de contaminação dos sedimentos no meio marinho pode ser efetuada por comparação das respetivas concentrações com concentrações de referência.

As concentrações de referência são calculadas utilizando a concentração de metal normalizada com o alumínio (Al) sendo estas posteriormente recalculadas para uma composição de 5% de Al, sendo posteriormente comparadas com valores de referência (BC) da OSPAR (OSPAR, 2008). As concentrações de metais também podem ser comparadas com os Critérios de Avaliação Ambiental (EACs) (OSPAR, 2008), que estabelecem valores abaixo dos quais as espécies marinhas estão protegidas de efeitos crónicos e valores máximos para os quais se espera que não promovam efeitos tóxicos (ERL).

2. METODOLOGIA

2.1 Amostragem

Para a colheita de amostras de sedimento, foram realizadas múltiplas campanhas oceanográficas e estuarinas (Tabelas I e II, Figura 1).

A amostragem foi realizada com recurso a um colhedor do tipo *Smith-McIntyre* e *Petit Ponar*. Após homogeneização as amostras foram acondicionadas em caixas e preservadas a -18 ºC até análise laboratorial.

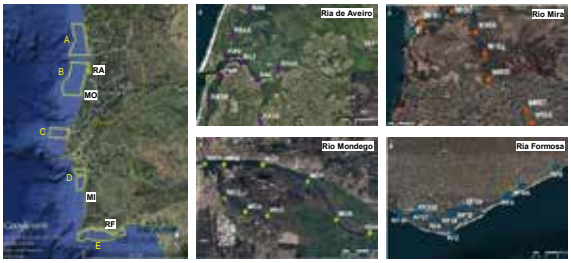


*Fig. 1. Mapa da área de estudo com a localização das áreas de amostragem oceânicas: **A** - Viana do Castelo a Porto; **B** - Aveiro a Figueira da Foz; **C** - Peniche; **D** - Setúbal a Sines; **E** - Tavira a Sagres e áreas estuarinas: RA – Ria de Aveiro; MO – Rio Mondego; MI- Rio Mira; RF – Ria Formosa.*

Tabela I. Campanhas AQUIMAR – amostras oceânicas, realizadas no período 2018 a 2020.

Campanha	AQUIMAR2018-1 AQUIMAR2018-2	AQUIMAR2019-1	AQUIMAR2019-3	AQUIMAR2020-2	AQUIMAR2020-3
Data	30-09 a 05-10-2018 05 a 27-10-2018	20 a 28-03-2019	30-09 a 12-10-2019	19-05 a 01-06-2020	16 a 23-09-2020
Navio	NRP "Auriga" NRP "Alm. Gago Coutinho"	NRP "Auriga"	NRP "Auriga"	NRP "Andrómeda"	NRP "Andrómeda
Área (nº amostras)	A (30), D (14), E (90)	B (51) , C (9)	C (5) , D (17), E (97)	A (40), B (44)	A (68)

Tabela II. Campanhas AQUIMAR – amostras estuarinas, realizadas no período 2019 e 2020.

Campanha	AQUIMAR2019-RA1 AQUIMAR2019-MO1 AQUIMAR2019-RF1 AQUIMAR2019-MI1	AQUIMAR2020-RA1 AQUIMAR2020-M01	AQUIMAR2020-RF2 AQUIMAR2020-MI2 AQUIMAR2020-RA2 AQUIMAR2020-MO2
Data	12-02-2019 13-02-2019 26-02-2019 28-02-2019	17-02-2020 18-02-2020	09-09-2020 10-09-2020 22-09-2020 23-09-2020
Área (nº amostras)	RA (11), MO (9), RF (12), MI (7)	RA (7), MO (7)	RF (10), MI (6), RA (9), MO (8)

2.2 Análise laboratorial

As amostras de sedimento foram fracionadas com um peneiro de malha 2 mm, homogeneizadas e congeladas a -18 ºC; liofilizadas e moídas em moinho de ágata; as digestões foram efetuadas em microondas Ethos Plus com ácido nítrico para análise dos metais chumbo (Pb), níquel (Ni) e cádmio (Cd) ou com água régia e ácido fluorídrico para análise dos restantes metais (Al, cobre (Cu), crómio (Cr), ferro (Fe), lítio (Li), manganês (Mn), mercúrio (Hg), zinco (Zn) e semi-metal arsénio (As)). A quantificação foi realizada por espetrometria de absorção atómica com chama/câmara de grafite para todos os metais e gerador de hidretos para o semi-metal As.
A análise granulométrica dos sedimentos foi realizada recorrendo à difração laser (fração <500 µm Malvern Mastersizer Hydro 2000) e peneiração com crivos (na fração >500 µm).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

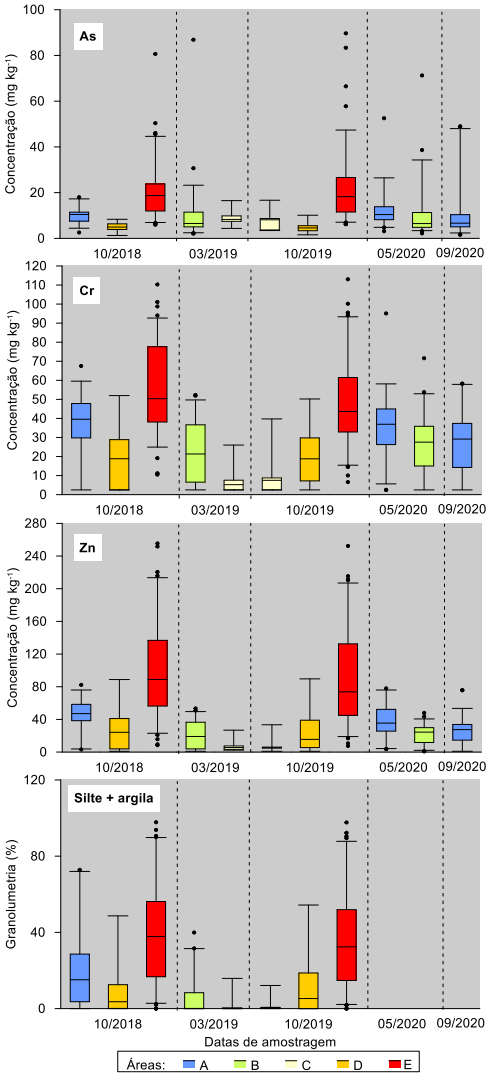
3.1 Sedimentos Oceânicos:

Na Figura 2 apresentam-se os resultados de concentração de As, Cr e Zn e a percentagem de finos (fração silto-argilosa, <63 µm) nos sedimentos colhidos nas 6 campanhas oceânicas efetuadas no período 2018 a 2020. Na figura estão apresentados os valores: medianas, mínimos e máximos por área. A área E é onde se observam as maiores percentagens de finos, seguido das áreas A>D>B>C conforme Fig. 2 verifica-se também uma maior variabilidade textural nos sedimentos da área E, relativamente às outras áreas. Os sedimentos da área C são os mais grosseiros quando comparados com as outras áreas.

Relativamente aos metais Cr e Zn e semi-metal As a área E apresenta, simultaneamente, os valores mais elevados de mediana e máximos de concentração destes elementos (valor max. As 90 mg kg^{-1}, Cr 113 mg kg^{-1}, Zn 255 mg kg^{-1}). A área B apresenta um valor máximo de As de 87 mg kg^{-1}, em 03/2019. Os valores de mediana mais baixos para os elementos apresentados verificam-se na área C, correspondendo esta à área com sedimentos mais grosseiros. Sedimentos com maior percentagem de fração fina apresentam concentrações mais elevadas em metais.

Entre campanhas, não se verificou variabilidade na % de finos o que indica que as condições ambientais nas áreas amostradas são estáveis.

Fig. 2. Concentração de As, Cr e Zn nos sedimentos das diversas áreas e % de silte+argila. (—): mediana; (⊥): percentil 5; (⊤): percentil 95.



As concentrações de metais foram comparadas com os critérios de qualidade EAC e ERL e com os BC. Nas Tabelas III e IV, apresentam-se médias, mínimos-máximos obtidos em cada área para cada metal, os valores de referencia EAC e ERL e os BC

definidos pela OSPAR, normalizados a 5 % de Al (OSPAR, 2008).

Tabela III. Resultados de sedimentos oceânicos e valores de referência EAC e ERL ([1]OSPAR, 2008; [2]OSPAR, 2014), $\bar{x}$ - média; m – mínimo; M – máximo. ≤ indica o Limite de Quantificação do respetivo método de ensaio.

	Área A $\bar{x}$ (m – M)	Área B $\bar{x}$ (m – M)	Área C $\bar{x}$ (m – M)	Área D $\bar{x}$ (m – M)	Área E $\bar{x}$ (m – M)	EAC [1]	ERL [2]
Al (%)	2,8 (0,2 – 5,8)	2,2 (0,63 – 4,0)	1,3 (0,94 – 1,7)	2,3 (0,85 – 5,2)	3,6 (0,16 – 8,3)	—	—
As (mg kg^{-1})	10 (1,7 – 52)	10 (2,1 – 87)	8,7 (0,8 – 6,7)	4,9 (1,3 – 10)	21 (6,0 – 90)	**1 – 10**	—
Cu (mg kg^{-1})	≤5,0 (≤5,0 – 15)	≤5,0 (≤5,0 – 8,8)	≤5,0	≤5,0 (≤5,0 – 17)	20 (≤5,0 – 62)	—	**34**
Cr (mg kg^{-1})	33 (≤5,0 – 95)	24 (≤5,0 – 72)	8,9 (≤5,0 – 40)	19 (≤5,0 – 52)	52 (6,6 – 113)	**10 – 100**	**81**
Hg (µg kg^{-1})	12 (≤8,3 – 58)	≤8,3 (≤8,3– 27)	≤8,3 (≤8,3 – 18)	38 (≤8,3 – 241)	194 (≤8,3 – 575)	—	—
Ni (mg kg^{-1})	≤7,5 (≤7,5 – 22)	≤7,5 (≤7,5 – 12)	≤7,5	≤7,5 (≤7,5 – 14)	13 (≤7,5 – 33)	**5 – 50**	—
Pb (mg kg^{-1})	≤10 (≤10 – 34)	≤10 (≤10 – 25)	≤10	≤10 (≤10 – 23)	25 (≤10 – 74)	**5 – 50**	**47**
Zn (mg kg^{-1})	34 (≤2 – 82)	22 (≤2 – 53)	8,6 (≤2 – 34)	26 (≤2 – 90)	97 (7,5 – 255)	**50 – 500**	**150**

Tabela IV. Resultados de sedimentos oceânicos e valores de referência BC, normalização a 5% de Al (OSPAR, 2014). $\bar{x}$ - média; m – mínimo; M – máximo.

	Área A $\bar{x}$ (m – M)	Área B $\bar{x}$ (m – M)	Área C $\bar{x}$ (m – M)	Área D $\bar{x}$ (m – M)	Área E $\bar{x}$ (m – M)	BC
As (mg kg^{-1})	32,6 (5,80 – 387)	36,9 (5,46 – 409)	37,2 (11,3 – 88,1)	12,2 (5,83 – 33,2)	63,8 (10,2 – 1214)	**15**
Cr (mg kg^{-1})	68,5 (6,47 – 372)	66,7 (7,45 – 258)	37,1 (8,04 – 135)	39,1 (8,04 – 88,8)	92,6 (46,0 – 538)	**60**
Cu (mg kg^{-1})	9,22 (2,73 – 68)	7,91 (3,41 – 19,8)	10,4 (7,43 – 13,2)	9,36 (4,29 – 29,6)	24,8 (8,44 – 98,5)	**20**
Ni (mg kg^{-1})	15,1 (4,21 – 160)	12,2 (4,75 – 54,1)	15,6 (11,2 – 19,9)	12,6 (6,44 – 24,9)	19,7 (7,99 – 118)	**30**
Pb (mg kg^{-1})	17,5 (4,70 – 248)	18,2 (6,33 – 117)	20,7 (14,9 – 26,5)	16,7 (8,58 – 37,0)	42,0 (6,68 – 374)	**25**
Zn (mg kg^{-1})	67,0 (3,49 – 256)	54,3 (3,37 – 169)	33,3 (4,04 – 113)	46,7 (3,79 – 158)	145 (57,2 – 762)	**90**

Tendo em conta os valores médios dos vários metais verifica-se que apenas o As (área E) ultrapassa o limite EAC. Relativamente aos valores máximos, para além do As também o Cr e o Pb ultrapassam o limite EAC (área E). Para os valores ERL, verifica-se que os valores médios obtidos se encontram abaixo do valor de referência. No entanto, na área E os valores máximos de Cu, Cr, Pb e Zn ultrapassam o ERL. Relativamente ao As, verifica-se que as médias ultrapassam o valor BC, exceto na área D, e que o valores máximos ultrapassam o valor de referência em todas as áreas. As médias do Cr apenas não ultrapassam o limite BC nas áreas C e D, e os máximos encontram-se sempre acima do limite BC. Em relação ao Cu, verifica-se que: a) apenas na área E a média é superior ao limite BC; b) nas áreas A, D e E os máximos ultrapassam o limite BC e, c) apenas nas áreas B e C todos os valores se encontram abaixo do limite de referência. Relativamente ao Pb e NI, as médias ultrapassam os respetivos limites BC apenas na área E, enquanto que os máximos se encontram acima dos limites BC em todas as áreas.

3.2 Sedimentos estuarinos:

Na Figura 3 estão representados os resultados de concentração o de Pb e Hg nas quatro áreas estuarinas.

Verifica-se que a Ria de Aveiro apresenta os valores mais elevados de Pb (máx. 102 mg kg^{-1}, est. RA11) e de Hg (máx. 1542 µg kg^{-1}, est. RA2), cerca de 10 e 30 vezes superiores, respetivamente, aos valores médios encontrados nas restantes estações da Ria (10 mg kg^{-1} Pb e 50 µg kg^{-1} Hg). Estes valores mais elevados podem estar relacionados com a atividade antropogénica, nomeadamente indústria localizada nessas áreas e ainda o facto de corresponderem a silte arenoso.

O estuário do rio Mondego apresenta, simultaneamente, os valores médios mais baixos de concentração de Pb (8,4 mg kg^{-1}) e de Hg (21 µg kg^{-1}), sendo a fração dominante areia.

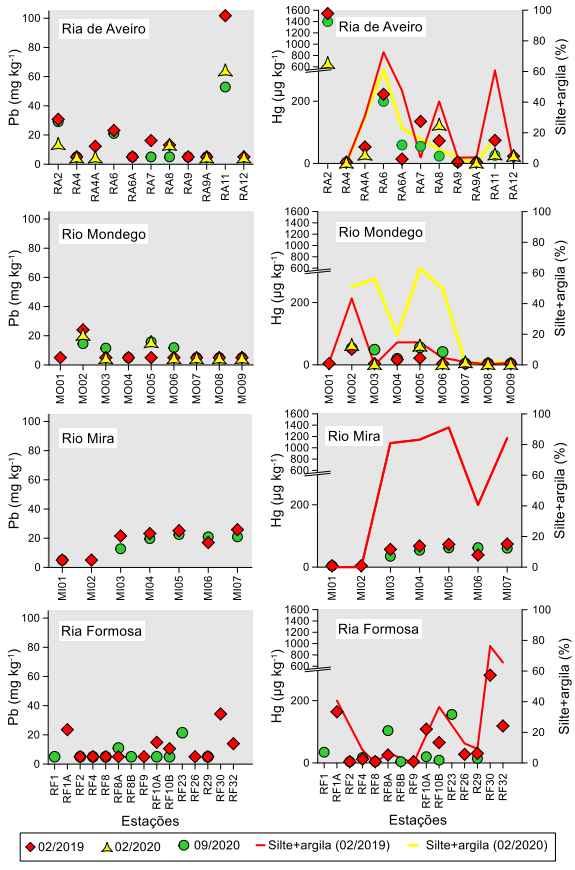


Fig. 3. Concentração de Pb, Hg e percentagem de silte+argila nos sedimentos das diversas áreas estuarinas.

No Rio Mira as concentrações de Pb e Hg são baixas e não variaram nas duas campanhas efetuadas. Verificou-se um aumento gradual das concentrações

da estação MI01 à MI07, com um ligeiro decréscimo na estação MI06. Esta distribuição dos metais pode estar relacionada com a classificação granulométrica das amostras: as amostras MI01 e MI02 são areias, as MI04, MI05 e MI07 são silte argiloso, enquanto a MI06 é é uma areia siltosa.

Na Ria Formosa os valores máximos de Pb (34 mg Kg^{-1}) e de Hg (282 Kg^{-1}) ocorrem na estação RF30, que foi onde se observou a maior % de partículas finas (sedimentos classificados como silte argiloso).

As concentrações de metais foram comparadas com os critérios de qualidade EAC e ERL. Na Tabela V apresentam-se as médias, mínimos-máximos obtidos em cada área estuarina para os diversos metais estudados e valores de referência EAC e ERL.

Tabela V. Resultados de sedimentos estuarinos e valores de referência EAC e ERL ([1]OSPAR, 2008; [2]OSPAR, 2014). $\bar{x}$ - média; m – mínimo; M – máximo.

	RA $\bar{x}$ (m – M)	MO $\bar{x}$ (m – M)	MI $\bar{x}$ (m – M)	RF $\bar{x}$ (m – M)	EAC [1]	ERL [2]
Al (%)	3,6 (1,1 – 6,2)	3,6 (2,1 – 5,5)	4,9 (0,5 – 8,1)	2,3 (0,5 – 6,7)	—	—
As (mg kg^{-1})	9,7 (1,1 – 30)	7,1 (3,0 – 22)	16 (6,7 – 21)	7,0 (1,0 – 24)	1 – 10	—
Cu (mg kg^{-1})	14 (≤5,0 – 100)	7,1 (≤5,0 – 26)	26 (≤5,0 – 46)	11 (≤5,0 – 50)	5 – 50	34
Cr (mg kg^{-1})	28 (≤5,0 – 69,1)	22 (5,3 – 62)	72 (5,8 – 108)	28 (≤5,0 – 88)	10 – 100	81
Hg (µg kg^{-1})	174 (≤8,3 – 1542)	21 (≤8,3 – 65)	46 (≤8,3 – 74)	54 (≤8,3 – 282)	—	—
Ni (mg kg^{-1})	9,3 (≤7,5– 37)	≤7,5 (≤7,5 – 20)	33 (≤7,5 – 50)	8,3 (≤7,5 – 24)	5 – 50	—
Pb (mg kg^{-1})	17 (≤10 – 102)	8,4 (≤10 – 24)	17 (≤10 – 26)	9,1 (≤10 – 34)	5 – 50	47
Zn (mg kg^{-1})	79 (3,7 – 371)	42 (9,2 – 111)	72 (4,0 – 106)	36 (≤2,0 – 178)	50 – 500	—

Os valores médios dos vários metais encontram-se abaixo do valor de referência ERL e do EAC, com exceção do As no rio Mira em que a média (16 mg kg^{-1}) ultrapassa o EAC. Relativamente aos valores máximos EAC, verifica-se que, com exceção do Ni e do Zn, os restantes metais ultrapassam o EAC, designadamente o As (em todos os estuários), Cu e o Pb na ria de Aveiro e o Cr no rio Mira.

Na Tabela VI, apresentam-se médias, mínimos-máximos dos resultados obtidos para os sedimentos colhidos nas áreas mais interiores e valores de referência BC. Verifica-se que, com exceção do Pb, os valores médios de concentração dos restantes metais se encontram acima do valor referência BC, em algumas áreas. Os valores máximos ultrapassam, de um modo geral, o limite BC em todas as áreas de estudo.

Tabela VI. Resultados de sedimentos estuarinos e valores de referência BC, normalização a 5% de Al (OSPAR, 2014). $\bar{x}$ - média; m – mínimo; M – máximo.

	RA $\bar{x}$ (m – M)	MO $\bar{x}$ (m – M)	MI $\bar{x}$ (m – M)	RF $\bar{x}$ (m – M)	BC
As (mg kg^{-1})	11,6 (3,5 – 36,5)	9,4 (4,2 – 22,2)	24,7 (8,6 – 64,2)	13,8 (7,7 – 27,5)	**15**
Cu (mg kg^{-1})	16,0 (3,4 – 84,3)	8,9 (2,8 – 26,5)	25,7 (15,5 – 49,5)	20,6 (6,4 – 51,3)	**20**
Cr (mg kg^{-1})	33,1 (6,5 – 58,3)	28,6 (11 – 62,4)	72,8 (47,1 – 116)	49,8 (18,3 – 88,9)	**60**
Ni (mg kg^{-1})	12,2 (4,7 – 31,0)	9,2 (4,2 – 19,8)	34,4 (23,3 – 60,5)	19,9 (9,0 – 36,5)	**30**
Pb (mg kg^{-1})	20,9 (4,8 – 85,8)	11,2 (5,64 – 29,2)	22,5 (12,4 – 48,2)	23,6 (12,0 – 48,7)	**25**
Zn (mg kg^{-1})	95,6 (11,6 – 313)	53,7 (21,2 – 112)	69,8 (39,0 – 128)	59,7 (7,8 – 137)	**90**

4. CONCLUSÃO

Verifica-se que sedimentos com uma maior percentagem de finos apresentam concentrações mais elevadas dos metais analisados. Não se verificou variabilidade textural e de teor em metais entre as campanhas efetuadas nos mesmos locais. Comparando com os criterios definidos nos documentos guia da OSPAR verificam-se algumas estações estuarinas mais expostas à ação antropogénica e que devem ser avaliadas no contexto de serem futuros locais de aquicultura.

Agradecimentos

Projeto MAR2020 nº MAR-02.01.01-FEAMP-0107 Célia Gonçalves, Marta Rico e Rita Santos receberam bolsas de Investigação no período de janeiro de 2019 a junho de 2021 no âmbito do projeto AQUIMAR (programa MAR2020). Co-financiado por:

REFERÊNCIAS

OSPAR (2008). *2007/2008 CEMP Assessment - Trends and concentrations of selected hazardous substances in the marine environment.* OSPAR Commission, 378/2008, 7-16.

OSPAR (2014). *Levels and trends in marine contaminants and their biological effects - CEMP Assessment Report 2013.* OSPAR Commission, 631/2014, 20-21.

PEAP (2015). *Plano Estratégico para a Aquicultura Portuguesa 2014-2020*. Governo de Portugal, 96 pp.

Índices de qualidade da água na Ria Formosa – uma ferramenta para avaliação do impacto de descarga de águas residuais

C. Correia (1), A. Matos (1), C. Ferreira (1), A. Barbosa (1), M. J. Lima (1), S. Caetano (1), J. Jacob (1), A. Cravo (1)

(1) Universidade do Algarve, CIMA, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal. cfcorreia@ualg.pt

Resumo: Os índices de qualidade da água, integrando vários parâmetros, são uma ferramenta eficaz na avaliação do seu estado. Estes índices transmitem de forma simplificada informação que pode ser usada por gestores ambientais/decisores para proteger os ecossistemas, com benefícios socioeconómicos. Este trabalho pretendeu avaliar o impacto da descarga das principais Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) da Ria Formosa durante 2018-2020, no âmbito do projeto CONPRAR. Aplicaram-se dois índices de qualidade da água: i) TRIX (trophic index), que avalia o estado trófico das águas, agregando dados (oxigénio, clorofila *a*, azoto e fósforo inorgânico); e ii) CCME QWI (*Canadian Council of Ministers of the Environment Water quality Index*), que foi adaptado também à salubridade dos bivalves. Os resultados destes índices mostraram que a qualidade da água melhorou substancialmente com o aumento da distância ao ponto de descarga das ETAR. Entre as várias áreas de estudo, as de Faro apresentaram a pior classificação, seguidas pela área de Almargem/Tavira e as de Olhão, onde se obteve a melhor classificação.

Palavras-chave: ETAR, índices, qualidade da água, Ria Formosa.

1. INTRODUÇÃO

A Ria Formosa apresenta um elevado valor ecológico e socioeconómico, fornece inúmeros serviços ecossistémicos, sendo o maior produtor de ameijoas *Ruditapes decussatus* a nível nacional. Este recurso, sendo filtrador, depende intrinsecamente da qualidade da água, a qual sofre influência de várias pressões antrópicas, nomeadamente de descargas de águas residuais (Cravo *et al.,* 2022). Para avaliar a qualidade da água deste ecossistema, usaram-se dois índices que integram vários parâmetros, e que funcionam como uma ferramenta eficaz, que pode ser usada por gestores/decisores ambientais de forma a proteger estes ecossistemas. Usou-se o índice TRIX, que avalia o estado trófico da água e adaptou-se o índice CCME WQI, tendo em consideração a salubridade dos bivalves.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A Ria Formosa é um sistema lagunar com múltiplas ligações ao oceano (Fig. 1), mesotidal, pouco profundo e bem misturado, apresentando elevada renovação de água com o oceano (Tett *et al*., 2003).

Neste sistema lagunar existem descargas de várias ETAR e neste estudo consideram-se as quatro principais, das 3 cidades mais importantes: Faro Noroeste (FNO), Faro – Olhão (FO), Olhão Nascente (ON) e Almargem (Tavira, T). A nova ETAR de Faro – Olhão foi implantada após a desativação das ETAR de Faro Nascente (FN) e Olhão Poente (OP), usando um tratamento de água mais avançado com lama aeróbia granular (sistema NEREDA®) e desinfeção final por radiação ultravioleta (UV).

2.2. Estratégia de amostragem

O período de amostragem decorreu entre setembro de 2018 e setembro de 2020. Foram amostradas mensalmente, em baixa-mar, secções longitudinais ao longo do gradiente de dispersão dos efluentes (1-2 km), a partir do ponto de descarga das ETAR (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**), incluindo zonas de viveiros de bivalves, sempre que possível.

Foram medidos, *in situ*, temperatura, salinidade, oxigénio dissolvido e pH, com uma sonda multiparamétrica (YSI EXO 2) e recolhidas amostras de água superficial (*ca* 20-30 cm) para análise de amónia, nitratos, nitritos, fosfato e silicatos, sólidos em suspensão, indicadores de contaminação fecal (*Escherichia coli* e enterecocos) clorofila *a* e abundância e composição de fitoplâncton.

2.3. Índice trófico TRIX

O índice TRIX (Vollenweider *et al.*, 1998) avalia o estado trófico das águas marinhas, integrando quatro parâmetros chave de qualidade de água, saturação de oxigénio (desvio absoluto dos 100%), clorofila *a*, concentração de azoto e fósforo inorgânico dissolvidos, através da equação:

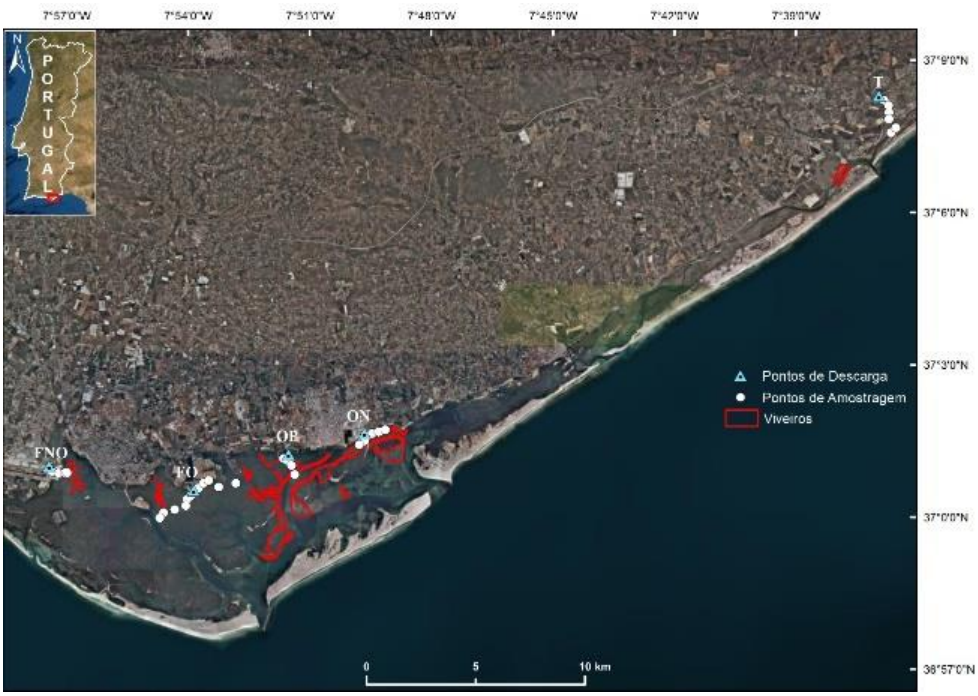


Fig. 1. Localização da Ria Formosa e das ETAR FNO (Faro-Noroeste); Faro-Olhão (FO); Olhão Poente (OP); Olhão Nascente (ON); e Tavira (T). Para cada ETAR estão identificados o ponto de descarga, as estações de amostragem e as áreas cobertas por viveiros de ameijoas Ruditapes decussatus (polígonos cedidos pela APA – Agência Portuguesa do Ambiente).

$$\text{TRIX} = \frac{[\log_{10}(\text{Chl } a \times a\%\text{DO} \times \text{DIN} \times \text{DIP}) - (-1{,}5)]}{1{,}2}$$

Chl a – concentração de clorofila a (µg L^{-1});
a%DO – desvio absoluto da saturação de oxigénio (%);
DIN – azoto inorgânico dissolvido (µg L^{-1});
DIP – fósforo inorgânico dissolvido (µg L^{-1}).

A escala varia de 0 a 10, adaptado a uma escala de cores: <4 Oligotrófico (estado trófico) ou Muito bom (estado de qualidade), azul; [4-5[Mesotrófico ou Bom, verde; [5-6 [Eutrófico ou Moderado, amarelo; [6-10[Hipertrófico ou Mau, vermelho (como proposto por Penna *et al*., 2004). Neste estudo foi feita uma análise da evolução do estado trófico da Ria Formosa, com base em dados históricos dos últimos 20 anos (2001-2002, Cravo *et al.,* 2015; 2006-2007, dados não publicados).

2.4. Índice CCME WQI

O CCME WQI (CCME, 2001, Uddin *et al*., 2021), foi adaptado para a Ria Formosa, como água para produção de bivalves e considerou os seguintes parâmetros e critérios de qualidade: salinidade (> 30); percentagem de oxigénio dissolvido (80-120%), clorofila *a* (≤ 5 µg/L); NH_3 (≤0,2 mg/L); *Escherichia coli* (< 300 UFC/100mL); *Pseudo-nitzschia* spp. (<80000 células/L); *Dinophysis* sp. (<200 células/L); *Gymnodinium catenatum* (<500 células/L). Este índice incorpora o número de parâmetros que não cumprem os objetivos de qualidade estabelecidos, a frequência de incumprimento e a grandeza do afastamento dos objetivos. A escala varia entre 0 e 100, e as classes de qualidade da água adotadas e respetivos códigos de cor atribuídos foram: Má (índice entre 0 e 44, vermelho); Marginal (índice entre 45 e 64, laranja); Razoável (índice entre 65 e 79, amarelo); Bom (índice entre 80 e 94, verde); e Excelente (índice entre 95 e 100, azul).

Este índice foi determinado de acordo com o procedimento descrito por CCME (2017):

$$\text{CCME WQI} = 100 - \left(\frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1{,}732}\right), \text{ onde}$$

F1 refere-se ao número de parâmetros que não cumprem os objetivos de qualidade definidos, F2 à frequência do incumprimento e F3 à grandeza do afastamento dos objetivos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Índice trófico TRIX

Este índice (Figuras 2a, b, c e d) mostra que a sequência de maior impacto nas quatro ETAR estudadas foi: FO e FNO> T > ON.

Em FNO (Fig. 2a), o estado trófico foi semelhante entre 2001-2002 e 2006-2007. Esta ETAR apenas sofreu alterações no sistema de tratamento (lamas ativadas + desinfeção UV) após setembro de 2009. Em 2018-20 verificou-se um agravamento do estado trófico, com classificação "Mau" na estação mais afastada do ponto de descarga, junto dos viveiros (850 m), possivelmente devido a aumento de caudal/ população servida e assoreamento do canal. Daqui resulta uma menor renovação de água no canal, o que justifica concentrações de nutrientes mais elevadas e ocorrência de extremos de oxigénio.

Em FO (Fig. 2b), o estado trófico também foi semelhante entre 2001-2002 e 2006-2007. Em 2018-20, após a entrada em funcionamento da nova ETAR, em outubro de 2018, verificou-se um agravamento do estado trófico, sendo hipertrófico até aos 1500 m e, possivelmente devido do aumento do caudal em 50% (máximo das ETAR), resultante do incremento dos afluentes provenientes da ETAR de Olhão Poente, que foi desativada. É importante sublinhar que nos primeiros 6 meses de arranque da nova ETAR o tratamento biológico ainda não tinha estabilizado. Contudo, no setor oeste, aos 2000 m, o estado trófico foi excelente, mostrando uma melhoria da qualidade da água no canal principal de Faro. Em OP (figura não representada), assim que a ETAR foi desativada houve uma melhoria da qualidade da água que passou para "Boa".

Em ON (Fig. 2c), o tratamento consiste em lamas ativadas + desinfeção UV, e o caudal é o mais baixo das ETAR estudadas, que é descarregado num canal principal, o canal de Marim (mais largo e profundo), que tem ligação à barra da Armona. Ao longo destes 20 anos de estudo o estado trófico tem-se mantido "Bom" (exceto no ponto mais perto da descarga), associado às correntes e renovação de água e ao evidente efeito de diluição dos efluentes.

A ETAR de Almargem (Fig. 2d) entrou em funcionamento em 2007 (lamas ativadas + desinfeção UV) e descarrega (caudal intermédio entre as várias ETAR) na ribeira de Almargem, com ligação Canal de Cabanas.

No baixo estuário do Rio Gilão (Tavira), assim que a antiga ETAR foi desativada, notou-se uma melhoria do estado trófico, em 2006-2007, relativamente a 2001-2002, com estado trófico "Excelente" a partir dos 750 m a partir do ponto de descarga. No período 2018-2020, no canal da Ribeira de Almargem, o estado trófico foi "Mau" até os 1000 m, possivelmente devido a um aumento de caudal descarregado num canal relativamente mais pequeno e menos profundo.

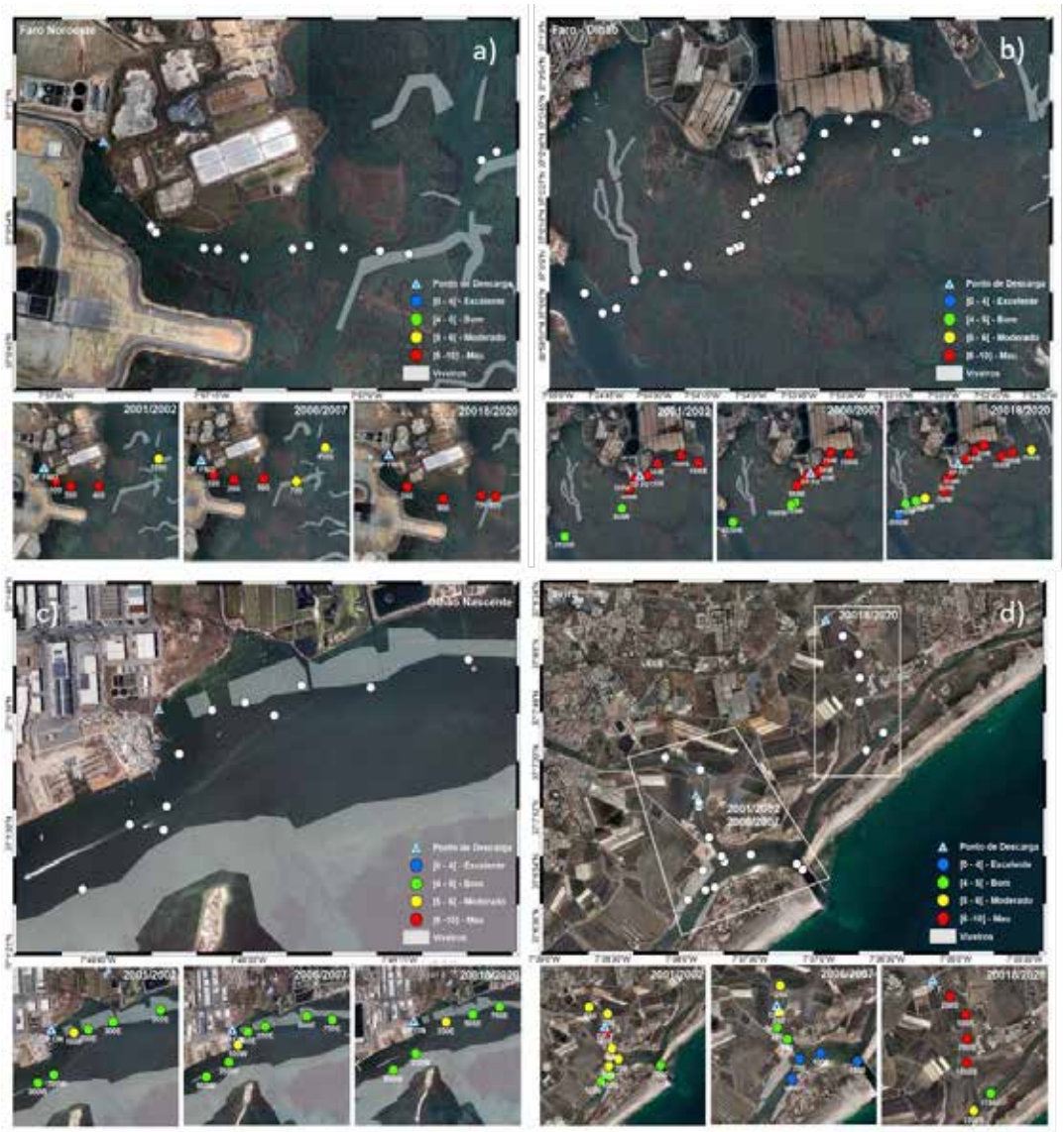


Fig. 2. Índice TRIX aplicado na área de estudo de a) FNO, b) FN, c) ON e d) T, nos períodos 2001-2002, 2006-2007 e 2018-2020. Os círculos brancos identificam os locais de amostragem e os coloridos referem-se à classificação do estado trófico.

3.2. *Índice CCME WQI*

Os dados do índice CCME WQI para a salubridade dos bivalves permitiu confirmar a mesma tendência do TRIX, e mostrar que no período global a pior classificação foi atingida na área de FO (má a razoável a 2000 m E), seguida de FNO (má a marginal a 750 m), Alm-Tavira (marginal a razoável a 1500 m), e classificação boa nas áreas de estudo ON e OP. Nas áreas de viveiros, a qualidade da água pode ser considerada boa, sugerindo que nessas áreas o impacto dos efluentes das ETAR foi reduzido e que a água foi favorável ao desenvolvimento dos bivalves.

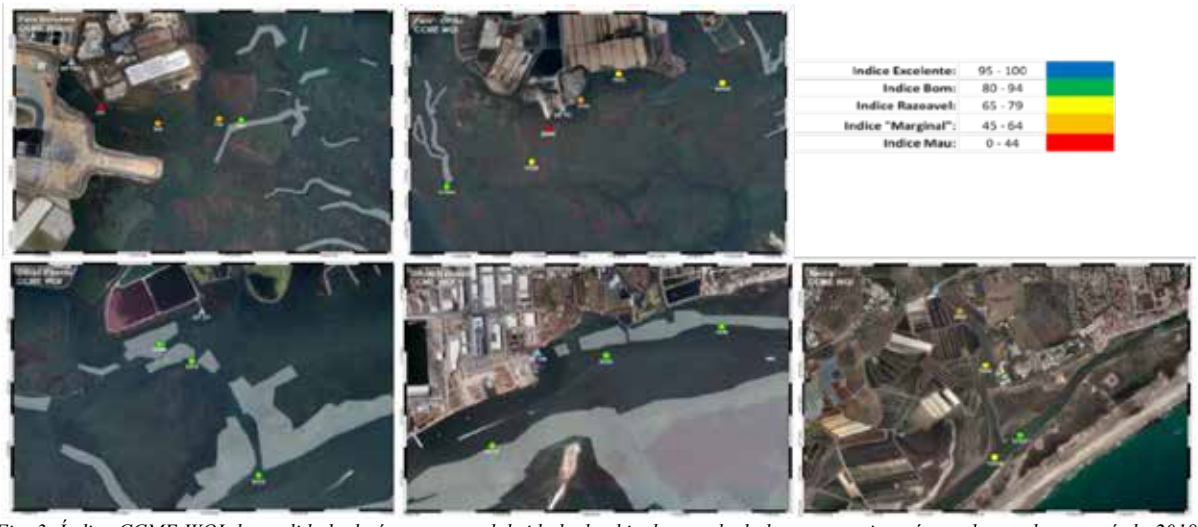


Fig. 3. Índice CCME WQI de qualidade de água para salubridade dos bivalves, calculado para as cinco áreas de estudo no período 2018-2020. Os círculos coloridos referem-se à classificação do CCME WQI como indicado na escala da figura

4. CONCLUSÕES

Estes resultados mostram que a qualidade da água melhora com o afastamento ao ponto de descarga das ETAR e que não depende apenas do caudal das mesmas (máximo impacto em FO), mas também da localização dos pontos de descarga, condições de circulação e regimes hidrodinâmicos (canais principais ou interiores, mais ou menos profundos).

Os índices revelam ser uma boa ferramenta, que pode transmitir informação agregada e de forma simples a gestores ambientais/decisores para proteger os ecossistemas, com benefícios socioeconómicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da PO Mar2020 (MAR-01.04.02-FEAMP-0003) e a ajuda de todos os voluntários durante as atividades de amostragem e laboratório e ao CIMA (ref: UID/00350/2020).

REFERÊNCIAS

Canadian Council of Ministers of the Environment. Canadian Environmental Quality Guidelines, (2001). *CCME Water Quality Index 1.0 User's Manual*, 5 pp.

Canadian Environmental Quality Guidelines Canadian Council of Ministers of the Environment, (2017). *CCME Water Quality Index 1.0 User's Manual 2017 Update*, 23 pp.

Cravo, A.; Fernandes, D.; Damião, T.; Pereira, C., and Reis, M.P., 2015. Determining the footprint of sewage discharges in a coastal lagoon in South-Western Europe. *Marine Pollution Bulletin*, 96, 197-206.

Cravo, A., Barbosa, A. B., Correia, C., Matos, A., Caetano, s., Lima, M. J., Jacob, J., (2022). Unrawelling the effects of treated wastewater discharges on the water quality in a coastal lagoon system (Ria Formosa, South Portugal): Relevance of hydrodynamic conditions, *Marine Pollution Bulletin*, 174, 113296.

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.

Uddin, G, Nash, S., Olbert, A., (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators* 122, 107218

Tett, P., Gilpin, L., Svendsen, H., Erlandsson, C.P., Larsson, U., Kratzer, S., Fouilland, E., Janzen, C., Lee, J.Y., Grenz, C., Newton, A., Ferreira, J.G., Fernandes, T., Scory, S., (2003). Eutrophication and some European waters of restricted exchange. *Continental Shelf Researsh* 23, 1635–1671.

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. *Envirometrics,* 9, 329-357.

Distribuição de Compostos Orgânicos em sedimentos superficiais de estuários e de zonas costeiras de Portugal Continental

P. Santos (1), T. Pulquério (2), J. Almeida, C. Palma (1)

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

(2) NOVA IMS Information Management School.

Resumo: A diversidade de contaminantes organoclorados é vasta, merecendo especial atenção os referenciados como poluentes orgânicos persistentes (POPs), designadamente, DDTs, HCHs e PCBs. Estes compostos têm tendência a se depositar nos sedimentos marinhos, funcionando estes como reservatório e fonte secundária de contaminação. A ressuspensão é uma importante fonte de organoclorados disponíveis na coluna de água. O presente estudo teve por objetivo, avaliar a qualidade do sedimento em cinco zonas da costa de Portugal Continental e quatro estuários com potencial para a atividade de aquicultura. Foram colhidos sedimentos superficiais, determinada a concentração em compostos organoclorados, e comparada com valores de referência de qualidade de sedimentos (SQGs). Foi também efetuada a distribuição espacial dos compostos analisados nos locais amostrados.

Palavras-chave: Plataforma Continental Portuguesa, compostos orgânicos, qualidade do sedimento.

1. INTRODUÇÃO

A sobrepesca tornou-se uma das maiores ameaças para os oceanos e seus ecossistemas, tendo surgido o Plano Estratégico para a Aquicultura Portuguesa (2014-2020), com o objetivo de desenvolver a produção aquícola. Enquadrado neste plano, surge o projeto AQUIMAR que pretende identificar, nas zonas delimitadas no Plano de Ordenamento do Espaço Marítimo (aquicultura potencial), aquelas que apresentam melhor aptidão para esta atividade, considerando as condições oceanográficas, físico-químicas, geoquímicas e biológicas.

Nos ecossistemas aquáticos, revestem-se de particular relevância as substâncias químicas de origem antropogénica referidas como poluentes orgânicos persistentes (POPs). Estes poluentes são transportados para os ambientes aquáticos por descarga direta ou indireta de águas residuais, escorrência das chuvas, transporte atmosférico e deposição (Wu *et al*., 2016; Hidayati *et al*., 2021). Possuem propriedades hidrofóbicas e lipofílicos, ligando-se fortemente à matéria orgânica particulada, sendo os sedimentos marinhos, o principal reservatório destes compostos, (Hu *et al*., 2016). Por serem altamente resistentes a degradações biológicas e fotolíticas permanecem no ambiente por muito tempo. O processo de ressuspensão em estuários e zonas costeiras pode atuar como uma fonte de POPs para a coluna de água sobrejacente. Alguns destes poluentes são facilmente transferidos do sedimento para a biota, ameaçando indiretamente a saúde humana devido à sua capacidade de biomagnificação através das cadeias alimentares aquáticas para níveis tróficos superiores (Hidayati *et al.,* 2021).

O presente trabalho centra-se em dois grupos de POPs: pesticidas organoclorados (OCPs) e os bifenilos policlorados (PCBs) em sedimentos superficiais de cinco zonas da Costa Portuguesa e de quatro estuários. Foram avaliadas as famílias: diclorodifeniltricloroetano e metabolitos[1](DDTs[2]), hexaclorociclohexanos(HCHs[3]), Ciclodienos (Drinas[4]); 7PCBs (PCB28,52,101,118,138,153,180) selecionados pelo *ICES*[5] como indicadores, do grau de contaminação (Wu *et al.,* 2016), e hexaclorobenzeno (HCB) . Foram avaliados os teores em matéria orgânica (MO), carbono orgânico total (TOC) e percentagem de Finos (Argila+Silte (fração fina <63 ¯m)).

2. ÁREA DE ESTUDO E METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

A área de estudo e pontos de amostragem (Figura 1) compreende 5 áreas da costa portuguesa (A a E) e os estuários da ria de Aveiro e Formosa e rio Mondego e Mira, correspondendo a um total de 60 amostras. As campanhas de amostragem decorreram em outubro de 2018 e março de 2019 na costa portuguesa, a bordo dos navios NRP Gago Coutinho e NRP Auriga, e em fevereiro de 2019 nos estuários.

[1] Metabolito – Derivado da metabólise do DDT

[2] DDTs= (*o,p'*-DDT, *p,p'*-DDT, *o,p'*-DDE, *p,p'*-DDE, *o,p'*-DDD, e *p,p'*-DDD)

[3] HCHs= isómeros (α-HCH, β-HCH, γ-HCH)

[4] Drinas=Aldrina, Dieldrina, Endrina)

[5] *ICES*-International Council for the Exploration of the Seas

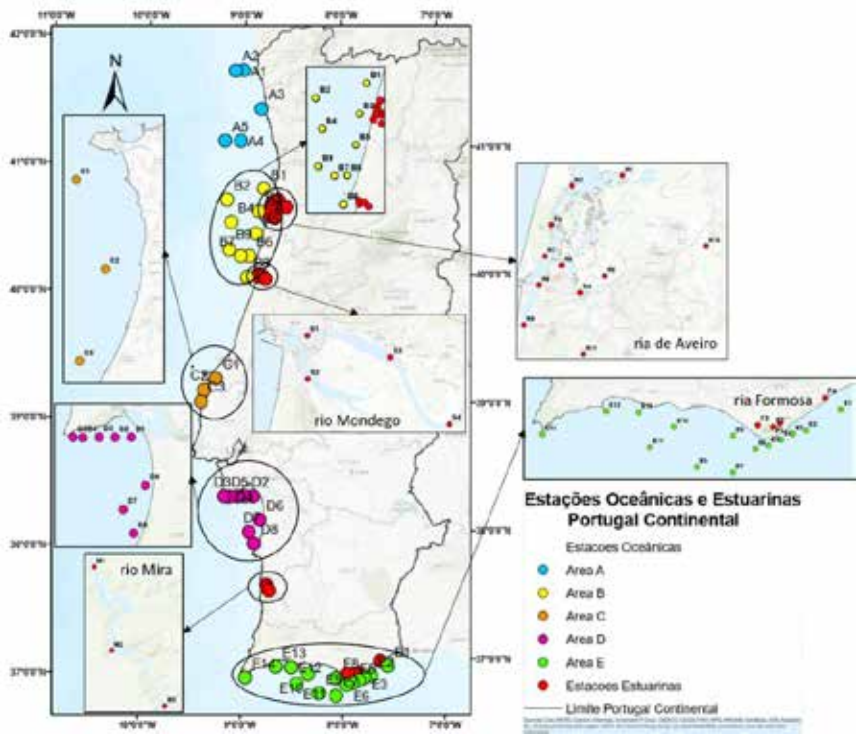


Fig. 1. Localização da área de estudo e respetivos pontos de amostragem (estações oceânicas e estuarinas).

A amostragem de sedimentos superficiais foi efetuada com dragas do tipo *Smith-McIntyre* (costa Portuguesa) e *Petit Ponar* (estuários). Após a colheita, as amostras foram crivadas, por via húmida, com peneiro de malha 2 mm, congeladas à temperatura de −18ºC e posteriormente liofilizadas e moídas.

2.2. Metodologia

A determinação dos compostos organoclorados baseia-se na extração das amostras, pela técnica de Extração Acelerada por Solvente (ASE), seguida de purificação e fracionamento do extrato orgânico. A identificação e quantificação dos compostos é efetuada por cromatografia em fase gasosa acoplada a detetor de captura eletrónica. A confirmação dos resultados foi efetuada numa segunda coluna cromatográfica com diferente polaridade. A análise granulométrica dos sedimentos, foi realizada por difração laser (fração <500 µm Malvern Mastersizer Hydro 2000) e peneiração com crivos (na fração >500 µm), MO e TOC por metodologia interna.

As concentrações individuais dos compostos que constituem cada uma das famílias (Drinas, HCHs, DDTs e 7PCBs) foram determinadas e apresentadas como soma (Σ), na (Figura 2); percentagem de Finos e MO apresentados na forma de (%). As amostras oceânicas e estuarinas, com concentrações iguais ou inferiores ao limite de quantificação do método (≤ LQ), para todos os compostos analisados, não foram representadas. São as estações oceânicas (A3, B3, B4, B5, B6, B8, C1, C2, C3, D1, D2, D6, D8, E12 e E14) e estuarinas (R8, S2, S3, S4, M1 e F4).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Distribuição Espacial de Organoclorados

A concentração total em compostos organoclorados, (ΣOCs) por área varia entre (mínimo e máximo), 0,78 ng g^{-1} e 1,34 ng g^{-1} na área A, 0,22 ng g^{-1} e 0,34 ng g^{-1} na área B, 1,24 ng g^{-1} e 3,78 ng g^{-1} na área D, e 0,37 ng g^{-1} e 5,75 ng g^{-1} na área E, sendo a concentração mais alta registada na estação E7, seguida da estação E9 com 5,48 ng g^{-1}. As amostras estuarinas com concentrações representativas são maioritariamente da ria de Aveiro, com ΣOCs a variar entre 0,06 ng g^{-1} e 2,33 ng g^{-1}, registando-se este valor na estação R10, seguida da estação R4 com 2,14 ng g^{-1}.

No rio Mondego apenas a estação S1 apresenta valores quantificáveis, com ΣOCs de 0,65 ng g^{-1}. No rio Mira as duas estações M2 e M3 apresentam ΣOCs de 1,10 ng g^{-1}. Na ria Formosa as concentrações variaram entre 0,17 ng g^{-1} e 1,10 ng g^{-1}.

Na zona costeira, os DDTs são a família química dominante, representando 50% do total de ΣOCs, seguido dos PCBs com 22%.

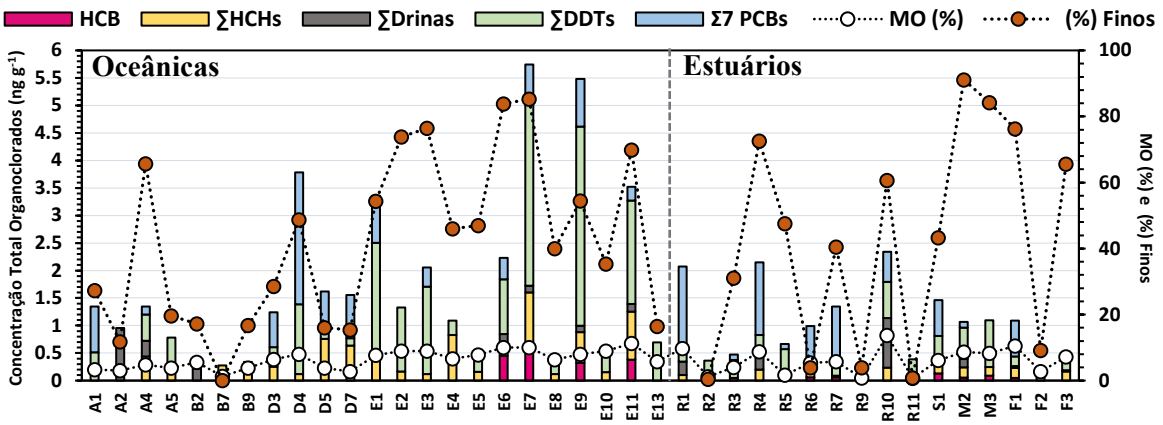


Fig. 2. Distribuição espacial de organoclorados na área de estudo e níveis de concentração (em base seca (bs)

3.2. Características físico-químicas dos sedimentos

A correlação entre ΣOCs, TOC, MO e (%) Finos, foi avaliada para as 39 amostras cujas concentrações foram quantificadas, usando o coeficiente de correlação de *Spearman* e níveis de significância de 95% e 99% (Tabela I). Verifica-se uma correlação estatisticamente significativa entre ΣOCs, (%) Finos e a MO, sugerindo que a concentração em ΣOCs é influenciada tanto pela MO como pela (%) Finos presentes no sedimento. Nas amostras oceânicas o teor em TOC é baixo, variando entre <0,1% e 1,2%, o que poderá explicar a baixa correlação entre o TOC e ΣOCs.

3.3. PCBs, DDTs e risco ecotoxicológico

As estações com ΣDDTs acima do LQ apresentam-se na (Figura 3). Na zona oceânica as concentrações em ΣDDTs variaram entre ≤ LQ e 3,4 ng g^{-1} (estação E7), sendo o *p,p'*-DDE o metabolito dominante com 40% do ΣDDTs, seguido do *p,p'*-DDD e *p,p'*-DDT que representam 20% e 18% respetivamente. Nos estuários o *p,p'*-DDE também é o metabolito dominante, representando 38% do ΣDDTs, seguido do *p,p'*-DDD com 24% e do *p,p'*-DDT com 22%.

***Tabela I** -Matriz correlação entre ΣOCs, MO, TOC e %Finos (39 amostras e níveis de significância de 95% e 99%).*

	MO (%)	TOC (%)	(%) Finos	ΣOCs
MO (%)	1			
TOC (%)	0,71**	1		
Finos (%)	0,81**	0,65**	1	
ΣOCs	0,61**	0,36*	0,56**	1

**p <0,05; **p <0,01*

A razão *p,p'*-DDT/(*p,p'*-DDE + *p,p'*-DDD) (Figura 3) é utilizada para saber se houve contaminação recente de DDT. Um valor <1 indica uma entrada antiga no meio aquático, enquanto um valor > 1 indica uma entrada recente (<5 anos) (Hidayati *et al*., 2021).

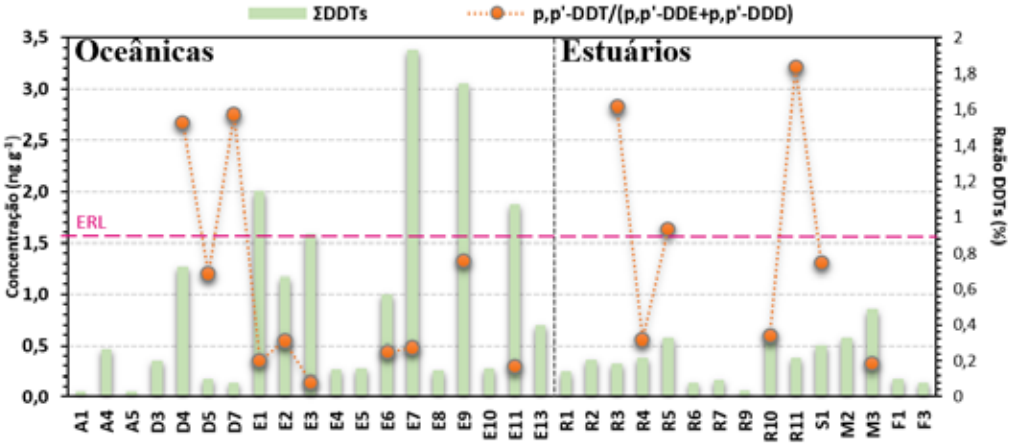


Fig. 3. Distribuição espacial da soma ΣDDTs na área de estudo e níveis de concentração (em base seca (bs))

As estações D4, D7, R3 e R11 indicam entradas recentes de DDT, enquanto estações sem a marca não apresentam *p,p'*-DDT. Em Portugal a utilização de DDT foi proibida na década de setenta, pelo que

uma explicação possível para os valores encontrados, será o DDT acumulado nos solos agrícolas, chega aos rios, estuários e áreas adjacentes pelas escorrências da chuva (Mil-Homens *et al.*, 2016). O ΣDDTs foi comparado com o guia de qualidade *Effects Range Low* (*ERL=1,58* ng g^{-1}) (Long *et al.*, 1995), para avaliar o risco ecológico potencial associado a estes compostos. São observadas concentrações acima do limite nas estações E1, E7, E9 e E11, sugerindo que nestes locais existe um risco potencial de ocasionalmente ocorrerem efeitos biológicos nos organismos marinhos. Na (Figura 4) está representada a Σ_7PCBs, que variou entre ≤ LQ e 2,4 ng g^{-1}, concentração registada na estação D4, sugerindo que este valor possa estar relacionado com a intensa indústria da construção naval que existiu no passado nesta área.

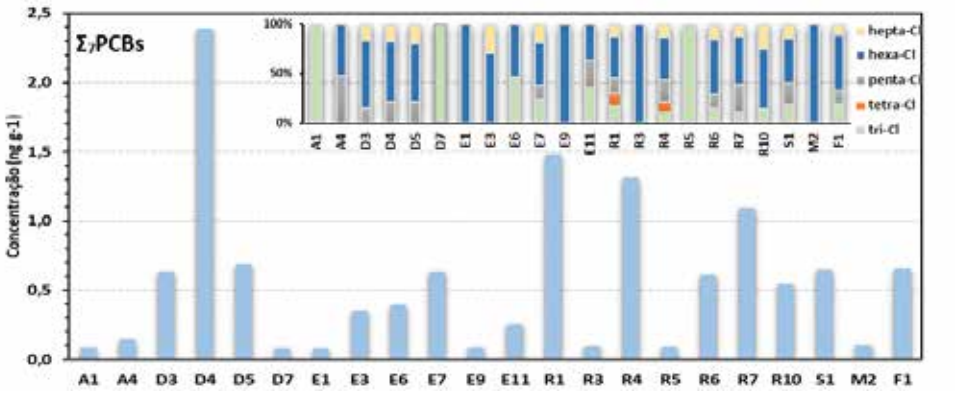


Fig. 4. Distribuição espacial da soma Σ_7PCBs *na área de estudo (concentrações em base seca (bs)) e composição em congéneres*

Os congéneres hexaclorados (PCB153+PCB138) são os mais abundantes na área de estudo, representando 58% e 49% da Σ_7PCBs, respetivamente na zona oceânica e estuarina. O Σ_7PCBs é muito inferior ao guia de qualidade (*ERL=11,5* ng g^{-1}) em todas as estações, não se prevendo efeitos biológicos nos organismos marinhos. Comparando com outras amostras de sedimentos de aquicultura no Canadá (New Brunswick, 1,07 a 10,4 ng g^{-1}), costa de Hong Kong e China (média de 7,96 ng g^{-1}) (Wang *et al.,* 2021), as concentrações obtidas nas áreas avaliadas de Σ_7PCBs obtidas são muito mais baixas.

4. CONCLUSÕES

As estações E7, E9 e D4 são as que apresentam concentrações mais elevadas em poluentes orgânicos. A distribuição espacial destes compostos, geralmente é afetada pelas correntes de água (oceânicas e de rios), deposição atmosférica e atividades antropogénicas, entre outras, não estando apenas relacionados com a proximidade das fontes que lhes deram origem. Na área de estudo. DDTs e PCBs são os grupos químicos dominantes.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto de caracterização geral de áreas AQUIcolas (AQUIMAR), cofinanciado pelo programa operacional Mar2020 (MAR-02.01.01-FEAMP-0107). Co-financiado por:

Agradece-se a Isabel da Silva Patriarca (Agência Portuguesa do Ambiente) pela disponibilidade e ajuda prestada.

REFERÊNCIAS

European Commission, 2019, – Marine chemical contaminants –support to the harmonization of MSFD D8 methodological standards. Matrices and threshold values/reference levels for relevant substances. JRC Technical Reports 89 pp.

Hidayati, N.V., Asia, L., Khabouchi, I. (2021) Ecological risk assessment of persistent organic pollutants (POPs) in surface sediments from aquaculture system. *Chemosphere,* 263, 128372.

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.

Mil-Homens, M., Vicente, M., Grimalt, J., Micaelo, C., Abrantes, F. (2016). Reconstruction of organochlorine compound inputs in the Tagus Prodelta. *Science of the Total Environment*, 540, 231-240.

Wu, Y., Wang, X., Ya, M., Li, Y. Hong, H. (2016). Distributions of organochlorine compounds in sediments from Jiulong River Estuary and adjacent Western Taiwan Strait: Implications of transport, sources and inventories. *Environmental Pollution*, 219, 519-527.

Method validation for inductively coupled plasma mass spectrometry determination of ten trace metals in undiluted seawater

P. Reis Marques (1), P. Brito (2,3)

(1) Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Instituto Politécnico de Setúbal, Rua Américo da Silva Marinho, 2839-001 Lavradio, Portugal

(2) Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), Avenida Dr. Alfredo Magalhães Ramalho, 6, 1495-006 Lisboa, Portugal. Email: pbrito@ipma.pt.

(3) Interdisciplinary Centre of Marine and Environmental Research (CIIMAR), Avenida General Norton de Matos S/N, 4450-208 Matosinhos, Portugal.

Abstract: An analytical procedure for the determination of ten trace elements in seawater samples has been developed and validated. The elements (V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb and U) were measured by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS, Perkin-Elmer NexION 2000C) after off-line analytes pre-concentration and matrix elimination. The sample pre-treatment was carried out by an automated system seaFAST-pico™ (Elemental Scientific Inc., USA), which is a low-pressure ion chromatography technique, based on solid-phase extraction principles. The two chromatography columns (Nobias, ESI CF-N-0200 SeaFAST 200 µL) contain a chelating resin with two functional groups, ethylenediamine triacetic acid (EDTriA) and iminodiacetic acid (IDA), buffered with acetic acid (HAc) and ammonia (NH_3). Efficient elimination of seawater matrix and up to 50-fold pre-concentration of metals enabled their accurate and precise quantification at ng L^{-1} level.

Keywords: matrix elimination, pre-concentration, seawater, seaFAST, ultra-trace metals.

1. INTRODUCTION

The implementation and validation of new sensitive analytical methodologies for the determination of contaminants in low-level matrices is extremely important for most environmental studies. It is therefore fundamental for the detection and characterisation of sources and pathways, but also for the definition and quantification of the different processes, determining their transport and destination through the environment and the identification or prevention of possible impacts of exposure to these contaminants.

Despite the technological advances in the development of analytical methods in recent decades, the quantification of trace elements in seawater samples remains a challenging analytical task and presents difficulties mainly due to their ultra-low concentrations and a high saline matrix. To respond to these difficulties, the inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) has become one of the most powerful and useful analytical tools, due to its ability to perform multi-element analyses but also to its low detection limits and wide linear dynamic range. As a result of the low content of analytes and the high concentration of matrix interferents, the determination in saline samples requires a previous step of pre-concentration of the analytes and a step of matrix separation. Several methods have been developed in recent decades, including co-precipitation, solvent extraction, and solid-phase extraction.

The SeaFAST-pico™ is an ultra-clean, automated, and low-pressure ion chromatographic system used for pre-treatment of undiluted seawater (ESI, 2022). It is controlled by fully automated software and consists of an autosampler, a sample loop with defined volume, a pre-packaged cleaning column and a pre-concentration column filled with chelating resin, three 12-way valves and four syringes for control of volumes and flows of all solutions used. The columns contain the chelating resin with two functional groups, ethylenediamine triacetic acid (EDTriA) and iminodiacetic acid (IDA), immobilized in a polymeric structure.

The objective of this study was the development and validation of an analytical procedure for the determination of ten trace elements in seawater samples. In this way, the selectivity, linearity and working range of the calibration curve, the analytical thresholds (limit of detection and quantification), repeatability and intermediate precision, as well as recovery and veracity were evaluated.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Reagents

All chemicals used in the present work were of ultra-pure grade and high-quality deionised water from an Arium® Pro Ultrapure Water System (Sartorius AG,

Germany) was used throughout this study. Standard working solutions (with V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb and U) were prepared by stepwise dilution of standard single-element stock solutions (1000 mg L^{-1} standard for ICP, Alfa Aesar Specpure ® Standards ICP-MS) in 2% HNO3. Internal standard solution of indium was prepared by diluting single element stock standard solutions (1000 mg L^{-1} Standard for ICP, Alfa Aesar Specpure® ICP-MS Standards) in 2% HNO_3. All laboratory material used was previously decontaminated in a 5% nitric acid solution and double rinsed in ultrapure water. The seawater samples (QTM311SW, QTM312SW, and QTM313SW) were obtained from 2021 Round 1 QUASIMEME – AQ3 proficiency test (metals in seawater).

2.2. Instrumentation

2.2.1. SeaFAST-pico sample pre-treatment system

The commercially available SeaFAST-pico™ system (Elemental Scientific Inc., USA) was used in the present study for matrix separation and analyte pre-concentration. The SeaFAST-pico parameters used in this study are shown in Table I.

Table. I. The SeaFAST-pico instrumental parameters used for seawater sample pre-treatment.

SeaFAST-pico parameters	
Analysis mode	Off-line
Columns resin	IDA and EDTriA groups
Buffer	Acetate buffer, pH 6
Eluent	10% HNO_3
Sample pH	< 2
Pre-concentration factor	50
Sample initial volume	10 mL
Eluent volume	200 µL

The method developed during this study for the determination of trace elements in seawater is based on two steps: pre-concentration of off-line elements and matrix separation by the SeaFAST-pico system and subsequent determination by ICP-MS of the trace elements in the eluted samples. Prior to loading any further samples, the column is automatically conditioned. In the first step of the automatic pre-treatment process, about 2 mL of ammonium acetate is mixed with 10 mL of acidified sample. Then, the sample is loaded, and the column washed with buffer solution to remove the alkaline and alkaline earth elements from the matrix. Subsequently, 200 µL of 10% HNO_3 is passed through the column in the reverse direction of column loading, and the pre-concentrated fractions are collected into 15 mL polypropylene tubes, obtaining a sample pre-concentration factor of 50 times. The entire process of pre-concentration and matrix separation of a sample is completed in 15 min.

2.2.2. ICP-MS measurements

Trace metals (^{51}V, ^{55}Mn, ^{57}Fe, ^{59}Co, ^{60}Ni, ^{65}Cu, ^{66}Zn, ^{111}Cd, ^{208}Pb and ^{238}U) were determined using a Perkin-Elmer ICP-MS (NexION 2000C), equipped with a cyclonic spray chamber, a concentric Meinhard nebulizer and a dual detector. A 6-point calibration curve was used to quantify each element, using a commercial indium solution as an internal standard. Reagent blanks, random sample duplicates and the QUASIMEME seawater samples were processed in the same way and analysed as an analytical quality control procedure to assess the accuracy and precision.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Method validation

The validation of the analytical method developed in this study was carried out in accordance with the recommendations given in the guidelines for the validation of the measurement procedure, namely the ISO/IEC 17025 standard on "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories" (*ISO/IEC 17025:2017, General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories*, 2017). The working range and linearity of the calibration curve, detection limit, repeatability, and intermediate precision, as well as recovery and veracity were evaluated.

3.1.1. Working range and linearity

The working range determination was made based on the expected concentrations for environmental samples of seawater as reference. The linear response of ICP-MS to the concentration of the studied trace elements was verified by measuring six standards covering the respective range in the pre-concentrated samples (from 0.010 µg L^{-1} to 20 µg L^{-1}) and evaluated through a statistical model, according to the ISO 8466-1 standard. The standard solutions were run in triplicate and on different days to demonstrate the repeatability of linearity, being evaluated first by the correlation coefficient (r) of the regression, with a value of $r \geq 0.995$ considered as a good correlation for the different calibration points.

3.1.2. Limit of detection and quantification

When studying the quantification of trace elements at low levels in complex matrices such as seawater, procedural blanks must be considered, in addition to routinely performed instrumental blanks. The analytical thresholds of the method under study were estimated experimentally under conditions of repeatability of the analytical procedure. To estimate the detection limit, 10 procedural blanks were analysed for several days, and the concentrations of trace elements and their respective standard deviations were calculated. The LD and LQ were calculated by multiplying the standard deviation obtained by the factor 3.3 and 10, respectively, and are presented in Table II.

Table II. Limit of detection and quantification (µg L^{-1}) of trace elements in sea waters (n = 10).

Isotope	LD	LQ
^{51}V	0.09	0.29
^{55}Mn	0.07	0.28
^{57}Fe*	1.8	3.1
^{59}Co	0.01	0.04
^{60}Ni	0.11	0.37
^{65}Cu	0.39	1.4
^{66}Zn	1.1	3.4
^{111}Cd	0.002	0.008
^{208}Pb	0.02	0.08
^{238}U	0.03	0.14

* The estimated LD and LQ values for ^{57}Fe indicated a contamination problem that is still being evaluated.

3.1.3. *Repeatability and intermediate precision*

The three seawater samples from the QUASIMEME proficiency test for metals in seawater (QTM311SW, QTM312SW and QTM313SW) were measured to assess repeatability and intermediate precision. Two or three replicate samples were measured on consecutive days using three different calibration curves. Repeatability was assessed by applying the same-day measurement procedure, while intermediate precision (with laboratory reproducibility) was assessed by analysing two subsamples on different days over a period of three months. Mean method repeatability (RSD) was 1–4% and intermediate precision was 1–9% for all trace elements.

3.1.4. *Trueness*

Systematic bias is related to the difference between a given mean value for the analyte and its accepted reference value. In general, is determined by the analysis of CRM or spiked samples whenever an adequate CRM for the analyte under study is not available. The analysis of these samples (CRM and/or fortified samples) covers all aspects of bias, if they are both matrix and element matched.

During this study, the three samples of seawater from the QUASIMEME proficiency test were analysed, the results obtained were compared (Z'-Score) with the reference values as reported in the final report (WEPAL, 2021) and are presented in Table III.

Table. III. Comparison of analytical results for trace elements in the seawater proficiency test samples. QUASIMEME reported values represent the Normal Distribution Approximation (ND-mean) and the Total Error used to calculate the Z'-Score. The mean concentrations obtained in this study are presented with their standard deviation (n = 3).

	QTM311SW		QTM312SW		QTM313SW	
	This study	Report	This study	Report	This study	Report
^{51}V	1.69 ± 0.070	1.80 ± 0.34	2.78 ± 0.21	3.00 ± 0.49	6.21 ± 0.45	6.81 ± 0.99
^{55}Mn	0.084 ± 0.016	na	4.28 ± 0.41	4.20 ± 0.73	3.46 ± 0.36	3.38 ± 0.63
^{57}Fe	1.21 ± 0.426	0.844 ± 0.566	4.85 ± 0.75	4.76 ± 0.87	10.4 ± 1.06	7.67 ± 1.46
^{59}Co	0.0075 ± 0.0004	0.0265 ± 0.0163	0.422 ± 0.030	0.447 ± 0.064	1.06 ± 0.05	1.08 ± 0.15
^{60}Ni	0.490 ± 0.019	0.506 ± 0.167	1.49 ± 0.14	1.66 ± 0.32	1.71 ± 0.12	1.91 ± 0.36
^{65}Cu	3.76 ± 0.17	3.51 ± 0.55	4.44 ± 0.33	4.35 ± 0.67	9.02 ± 0.59	9.01 ± 1.25
^{66}Zn	2.69 ± 0.13	2.52 ± 0.54	21.0 ± 1.3	20.6 ± 2.8	23.1 ± 1.7	23.3 ± 3.2
^{111}Cd	0.0135 ± 0.001	0.0138 ± 0.053	0.238 ± 0.004	0.231 ± 0.032	0.827 ± 0.029	0.816 ± 0.107
^{208}Pb	0.022 ± 0.002	na	1.01 ± 0.08	1.08 ±0.14	1.80 ± 0.11	1.90 ± 0.25
^{238}U	1.22 ± 0.01	*	1.08 ± 0.09	*	0.509± 0.086	*

na - no assigned value was calculated; * - not in the test scope.

4. CONCLUSIONS

The analytical procedure for trace element quantification in seawater samples, based on ICP-MS combined with off-line matrix separation and analyte pre-concentration (SeaFAST-pico system) allowed to reach the pre-concentration factors for all elements up to 50 times, while the removal of matrix components proved to be efficient. The developed method presented low procedure blank values and low detection limits (ng L^{-1}) except for Fe and Zn, revealing some contamination in the process. The rapid separation and pre-concentration process, combined with multi-element detection capabilities, makes the developed analytical procedure suitable both for environmental monitoring programs and studies related to concentrations of trace elements in the oceans. The analytical procedure is still in the validation phase, presenting satisfactory and promising results, as shown by the results obtained in the QUASIMEME proficiency test, with satisfactory performances, with Z'-Score < |2|.

REFERENCES

ESI. (2022). *seaFAST - Automated Preconcentration System for Undiluted Seawater*.

ISO/IEC 17025:2017, General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories, (2017) (testimony of International Organization for Standarization).

WEPAL. (2021). *AQ3 Metals in seawater - Report 2021.1. July*.

Assessment and comparison of microplastic contamination in Atlantic navigation routes in the first semester of 2020

J. Almeida (1), L. Gomes (1), C. Singdahl-Larsen (2), N. Buenaventura (2), V. Morgado (1, 3), M. Olsen (2), R. Bettencourt da Silva (3), C. Palma (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. Jose.Almeida@hidrografico.pt

(2) Norwegian Institute for Water Research (NIVA), Økernveien 94, 0579 Oslo, Norway

(3) Centro de Química Estrutural, Institute of Molecular Sciences, Departamento de Química e Bioquímica, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal

Abstract: In the context of the Commemorations of the V Centenary of the Circumnavigation Voyage led by Fernão de Magalhães, the NRP Sagres undertook a Circumnavigation voyage between January and May 2020, interrupted by the pandemic. One of the scientific activities that took place on board consisted of collecting samples from the ocean surface, allowing the assessment of the spatial distribution of microplastics in the Atlantic Ocean. As part of the Mar Aberto mission between December 2020 and February 2021, samples were collected between Lisbon and Cape Verde. The places with the highest concentrations of microplastics were found in urban areas, namely in Cape Verde, Rio de Janeiro, and close to South Africa. The contamination observed in different areas was compared by taking determination uncertainty into account. This study provided contamination data from areas with previous little information concerning microplastics concentration on board of Portuguese ships, something unprecedented so far.

Keywords: microplastics, Atlantic Ocean, NRP Sagres.

1. INTRODUCTION

Microplastics (MPs) can be generally defined as "any synthetic solid particle or polymeric matrix, with regular or irregular shape and with size ranging from 1 µm to 5 mm, of either primary or secondary manufacturing origin, which are insoluble in water" (Frias & Nash, 2019). Several studies have documented the presence of MPs in various environments such as the open ocean, estuaries, beaches, oceanic gyres, polar areas, deep-sea sediments and freshwater systems (Antunes *et al*., 2018; Eerkes-Medrano *et al*., 2015). Their origins are quite diverse. The land-based sources include various industrial and domestic products, plastic industry, synthetic textiles released from washing machines, (Barboza *et al*., 2019), as well as a bad or lack of waste management and discard of litter (e.g., cigarette butts, plastic bags, and cups), ending up in the aquatic systems. Regarding marine-based sources, derelict fishing gear and maritime transportation are important on a regional and international scale, with some of the plastic released being then transported by wind and ocean currents to different places from where they were released (Barboza *et al*., 2019; Cardoso & Caldeira, 2021).

The European Commission attributed a specific descriptor, number 10, in the Marine Strategy Framework Directive to marine litter, including small dimension litter and plastic (EC, 2008). As for larger-scale studies of plastic in the Atlantic Ocean, there were two studies in the North and South Atlantic by Cózar *et al*. (2014) and Kanhai *et al*. (2017). There is still a need for harmonisation of protocols and standards, as well as long-term monitoring programs to follow the evolution of MPs presence in various environmental compartments. Regarding the water matrix, the three most common sampling methods are the following: i) at the surface with a neuston net, ii) in-depth with a bongo net, and iii) in-depth through a ships' underwater system (if possible) (Prata *et al*., 2019; Lusher *et al*., 2014).

The circumnavigation of the NRP Sagres was part of the celebration of the V Centenary of the First Circumnavigation Voyage, initially led by Fernão de Magalhães. Several scientific projects were aboard the circumnavigation, one of them being the collection of water samples to analyse the dispersion of MPs in the Atlantic Ocean. This project was promoted by the Instituto Hidrográfico (IH), which collected, transported, analysed, and distributed the samples among partners. The Norwegian Institute for Water Research (NIVA) contributed to the analysis of part of the samples. The Centro de Química Estrutural (CQE@FCUL) contributed to the discussion of the results with their know-how in determining the measurement uncertainty and the level of pollution of samples.

2. DATA AND METHODS

On board of the NRP Sagres, 130 samples were collected from the Atlantic Ocean between January and May 2020. Due to the outbreak of Covid-19 during the first trimester of 2020, the Portuguese

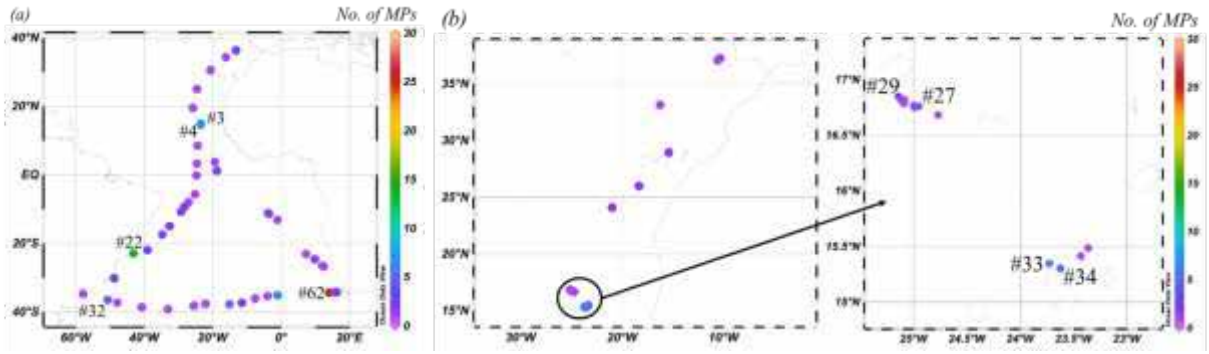


Fig. 1. : Stations of the NRP Sagres (a) and "Mar Aberto" (b) campaigns where MPs were found. The stations with the highest number of MPs are numbered. The warm colours correspond to higher number of MPs found, while the cold colours correspond to lower numbers.

Government decided that the NRP Sagres would arrive at Cape Town (South Africa) and return to Lisbon. The course of the ship was Canary Islands, passing by Cape Verde, Brazil and Argentina, to South Africa and back to Lisbon.

Due to this interruption, leading to the reduction of the sample numbers, the "Mar Aberto" campaign took place on board the NRP Gago Coutinho between December 2020 and February 2021, from Lisbon to Cape Verde and back. During the "Mar Aberto" campaign, 52 water samples were collected to complement the NRP Sagres samples. The interruption of the circumnavigation voyage also suspended the analysis of marine litter and physicochemical parameters with a multiparametric probe when entering the Indian Ocean, after Cape Town. Thus, studies on the determination of uncertainty and assessment of pollution levels were added to the project as a complement.

The water samples were collected from the water system of the ships and passed through a 50 µm metal sieve. The water was pulled from the draught of both ships at approximately 5.6 m depth. The material retained in the sieve was filtered through a VWR 1.2 µm pore glass fibre filter (Ø 47 mm, GF/C). The filters were preserved in glass petri dishes until analysis in the laboratory.

To control the possibility of airborne contaminations, control filters were placed inside open Petri dishes during the filtration process.

The content on the filters was analysed under a stereomicroscope, with the particles suspected of being plastic isolated and analysed by a PerkinElmer micro Fourier transform infrared spectrometer in micro attenuated total reflectance mode. Photos of each particle, sizes, shape, colour and identification of the type of polymer were registered. The samples from the NRP Sagres were divided between the IH and NIVA partners; the "Mar Aberto" campaign samples were all analysed by the IH.

The natural (cellulose) and semi-synthetic fibres (e.g., rayon, viscose, etc.) were excluded from the data analysis, as they do not constitute polymers of plastic marine debris. To distinguish between plastic pollution and analytical contamination, the polymers in the samples whose characteristics (i.e., shape and colour) matched the ones found on the associated control filters were discarded.

The concentrations are presented in number of MPs per m^3 of filtered water (MP m^{-3}). The stations from the NRP Sagres campaign are named as "S#*sample number*", and from the "Mar Aberto" are named as "MA#*sample number*".

3. RESULTS

3.1. NRP Sagres campaign

Regarding the NRP Sagres campaign (Fig. (a)), 37% of the particles isolated from the samples were plastic polymers (857 out of 2316). The 857 plastic particles were compared with the respective control filters to discard the ones considered as contamination, resulting in 131 particles, whose shape, colour, size and polymer type distributions are expressed in Fig. 1.

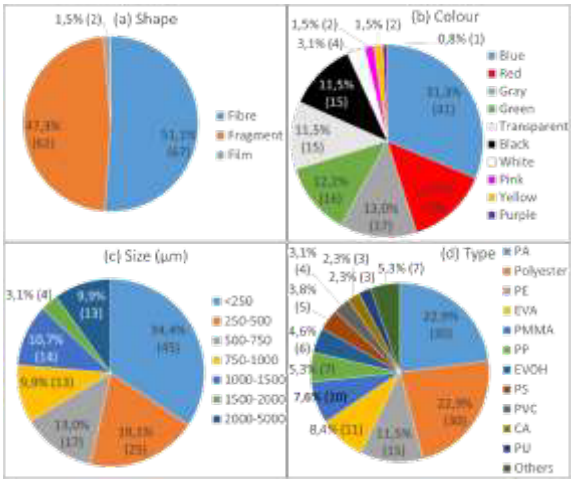


Fig. 1.: Results of the NRP Sagres campaign by shape (a), colour (b), size (c) and polymer type (d). The results are presented in percentage and in MPs number between parentheses.

Stations S#3 and S#4 from the island of Santiago in Cape Verde had 7 MPs each, associated to

concentrations of 5.13 MP m^{-3} and 8.57 MP m^{-3}, respectively. S#3 contained 5 polyethylene (PE) and 2 polychloroprene fragments, while S#4 contained 2 fibres and 1 fragment of polyester, 1 styrene-acrylamide copolymer fragment, 1 ethylene-vinyl acetate (EVA) fragment, 1 polyamide (PA) fragment, and 1 poly(methyl methacrylate) (PMMA) fragment.

In Rio de Janeiro, Brazil (S#22), the sampling took place inside Guanabara Bay. In this station, 14 MPs were found, which represented a concentration of 33.82 MP m^{-3}. It contained 5 polyester fibres, 1 fibre and 2 fragments of polystyrene (PS), 2 polyvinyl chloride (PVC) fragments, 1 acrylonitrile-butadiene copolymer fragment, 1 PE fragment, 1 PMMA fibre, and 1 polypropylene (PP) fibre.

Station S#32, close to Argentina, registered 3 fibres and 1 fragment of polyester, and 1 PA fragment, corresponding to a concentration of 3.41 MP m^{-3}.

In S#62, close to Cape Town, South Africa, 26 MPs were found, which represent a concentration of 56.83 MP m^{-3}. It contained 9 EVA fragments, 6 ethylene vinyl alcohol (EVOH) fragments, 5 polyester fibres, 2 fibres and 1 fragment of PA, 1 fibre and 1 fragment of PMMA, and 1 PE fragment.

3.2. "Mar Aberto" campaign

Regarding the "Mar Aberto" campaign (Fig. (b)), 33% of the particles isolated from the samples were plastic polymers (327 out of 999). From the comparison of those 327 particles with the control filters resulted in 36 particles. The shape, colour, size and polymer type distributions are presented in Fig. 2.

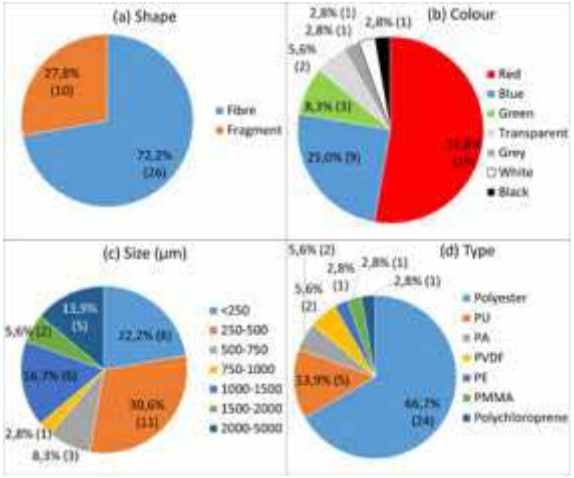


Fig. 2.: Results of the "Mar Aberto" campaign by shape (a), colour (b), size (c) and polymer type (d). The results are presented in percentage and in MPs number between parentheses.

The MPs found between stations MA#19 and MA#36 in Cape Verde account for 72.2% of all the MPs counted, which include 17 polyester fibres, 4 polyurethane (PU) fragments, 2 polyvinylidene fluoride (PVDF) fragments, 2 PA fibres and 1 PMMA fibre.

3.3. Determination and comparison of the pollution levels

The contamination observed in different areas was compared by considering the uncertainty evaluation. Besides the concentration of MP m^{-3}, the distance between starting and ending coordinates of each station were taken into consideration, expressing the results as "(Mode; [Confidence limits]) MP m^{-3} km^{-1}", for a 99% confidence level.

Sample S#22 presented the highest level of pollution (37.9264; [13.6643; 67.9946] MP m^{-3} km^{-1}, followed by S#3 (5.9190; [0.7326; 11.1501]) MP m^{-3} km^{-1}, which is equivalent to S#4, S#25, S#26, S#29, S#62, and MA#43 and #MA44, and greater than the remaining samples. S#23 presented the lowest level of MP pollution, (0.0001; [0; 0.0016]) MP m^{-3} km^{-1}.

4. DISCUSSION

From the NRP Sagres campaign, the MPs distribution patterns from Cádiz to Cape Town were compared with Cózar *et al*. (2014), and from Cape Town to Lisbon with Kanhai *et al*. (2017). The results were generally similar, with the exceptions of the stations close to Cape Verde and Rio de Janeiro, where MPs concentrations were higher than the ones reported by Cózar *et al*. (2014), and nearby Portugal, where the MPs concentration registered was about half of that by Kanhai *et al* (2017). Between Rio de Janeiro and Cape Town, the NRP Sagres registered low MPs concentrations, while Cózar *et al*. (2014) registered some of the highest as they crossed the South Atlantic gyre, which is a known accumulation zone. This may have to do with the NRP Sagres route being further south than the Malaspina's was. However, caution is required in the comparison with Cózar *et al*. (2014) since they considered plastic debris, did not provided information on the debris collected, used a neuston net to collect samples, and reported their results in g km^{-2}.

Of all the particles isolated by Kanhai *et al* (2017), 37% were synthetic polymers. Regarding the MPs characteristics, 94% were fibres, 72% were blue, 46% were between 250 µm and 500 µm, and 49% were polyester. As such, the only similarity with the NRP Sagres campaign results is with the percentage of MPs found.

Sample S#62 was collected at night, and a bioluminescence phenomenon was observed in water and on the sieve. This phenomenon may give a clue to the high concentration of MPs found at this site. Badylak *et al*. (2021) noted that small MPs and microplankton communities, such as diatoms, with similar size ranges and densities, rely on vertical mixing energy to maintain position in the water column. As such, a possible accumulation of MPs and microplankton may explain the high concentrations at this station. However, this hypothesis needs further testing to better justify what was observed.

In the Cape Verde archipelago, Fernandes (2019) collected debris only in a north-facing beach in Santa Luzia, of which around 60% were plastic, with the majority being fishing nets and ropes. The author suggested that the exposure of that beach to the Canary current has a major role in the transport of debris. Cardoso & Caldeira (2021) noted that the higher percentage of fishing gear found may have originated in the North-western African coast and south of the Cape Verde archipelago, transported by the Mauritanian Current and the North Equatorial Counter Current, respectively, since fishing nets and octopus traps are less influenced by wind due to their morphology. The fishing gear transportation by currents and its subsequent deterioration may explain the higher percentage of fibres found in the "Mar Aberto" stations south of the São Vicente island, while the origin of the particles found in the two NRP Sagres stations may be the harbour where the ship was moored. Cardoso & Caldeira (2021) concluded that, because of the archipelago location, Cape Verde is in a complex oceanographic context, which exposes it to significantly different sources.

5. CONCLUSION

Two campaigns took place in the Atlantic Ocean and in the Cape Verde archipelago to analyse the dispersion of MPs. Most of the samples collected presented low or null MPs concentrations, with some exceptions in samples from Cape Verde, the urban centre of Rio de Janeiro, (Brazil), and close to Cape Town (South Africa). Despite the differences in methodologies and units, there is some agreement in the MPs patterns presented in this study and in the scientific literature. The differences found during the comparison enhance the need for harmonisation of protocols and standards.

Acknowledgments
This bilateral initiative FBR/05, named "NRP Sagres 2020", was funded by the EEA Grants–Financial Mechanism 2014-2021.

REFERENCES

Antunes, J., Frias, J., Sobral, P. (2018) Microplastics on the Portuguese coast. *Marine Pollution Bulletin*, 131, 294-302.

Badylak, S., Phlips, E., Batich, C., Jackson, M., Wachnicka, A. (2021) Polystyrene microplastic contamination versus microplankton abundances in two lagoons of the Florida Keys. *Scientific Reports*, 11(1), 1-10.

Barboza, L., Frias, J., Booth, A.M., Vieira, L.R., Masura, J., Baker, J., Foster, G., Guilhermino, L. (2019) Microplastics Pollution in the Marine Environment. In: Charles Sheppard (ed.). *World Seas: An Environmental Evaluation*. Academic Press, London, 329-351.

Cardoso, C. & Caldeira, R.M. (2021) Modeling the exposure of the Macaronesia islands (NE Atlantic) to marine plastic pollution. *Frontiers in Marine Science*, 8, 653502.

Cózar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J.I., Irigoien, X., Úbeda, B., Hernández-León, S., Palma, A.T., Navarro, S., García-de-Lomas, J., Ruiz, A., Fernández-de-Puelles, M.L., Duarte, C.M. (2014) Plastic debris in the open ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(28), 10239-10244.

Eerkes-Medrano, D., Thompson, R.C., Aldridge, D.C. (2015) Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs. *Water Research*, 75, 63-82.

European Commission (2008). Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council Establishing a Framework for Community Action in the Field of Marine Environmental Policy (Marine Strategy Framework Directive). Brussels: Official Journal of the European Union L164, 19–40.

Fernandes, M.F. (2019) Quantification of macro and microplastics on a Desert Island, Santa Luzia, Cabo Verde Archipelago, North East Atlantic Ocean. Master's thesis, Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Frias, J. & Nash, R. (2019) Microplastics: finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145-147.

Kanhai, L., Officer, R., Lyashevska, O., Thompson, R.C., O'Connor, I. (2017) Microplastic abundance, distribution and composition along a latitudinal gradient in the Atlantic Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 115(1-2), 307-314.

Lusher, A., Burke, A., O'Connor, I., Officer, R. (2014) Microplastic pollution in the Northeast Atlantic Ocean: validated and opportunistic sampling. *Marine Pollution Bulletin*, 88(1-2), 325-333.

Prata, J.C., da Costa, J.P., Duarte, A.C., Rocha-Santos, T. (2019) Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: a critical review. *Trends in Analytical Chemistry*, 110, 150-159.

Metais no estuário do Sado (2018-2020)

J. Almeida (1), C. Palma (1), A. Brito (2)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. Jose.Almeida@hidrografico.pt.

(2) MARE - Centro de Ciências do Mar e do Ambiente, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa.

Resumo: A importância dos estuários na fixação das comunidades tem contribuído para o aumento da poluição nestes sistemas e para a potencial degradação do seu estado ao longo dos tempos. No âmbito do projeto AQUASADO, foram realizadas 13 campanhas de colheita de amostras da coluna de água e 4 campanhas de colheita de sedimentos do estuário do Sado entre 2018 e 2020, com o objetivo de analisar as concentrações de metais e avaliar a qualidade ambiental do estuário. Os resultados foram comparados com legislação nacional e europeia, índices de qualidade e fatores de enriquecimento. As estações em torno da zona industrial da Marateca apresentaram as maiores concentrações de metais em águas e sedimentos, assim como nos sedimentos a jusante do canal de Alcácer. Comparando com dados históricos (1986–2010), considera-se que não houve um agravamento da qualidade ambiental nos últimos anos.

Palavras-chave: coluna de água**,** estuário do Sado**,** metais, qualidade ambiental, sedimentos.

1. INTRODUÇÃO

Os estuários têm sido zonas de eleição para o estabelecimento de comunidades humanas ao longo dos tempos. Com o desenvolvimento da agricultura e indústria, a poluição destes ambientes tem sido uma preocupação nas últimas décadas, levando à instauração de programas de monitorização da qualidade das várias matrizes (água, sedimento, biota) dos estuários e zonas costeiras. Um dos contaminantes que tem sido estudado são os metais, que estão presentes naturalmente no ambiente, fazendo parte de ciclos biogeoquímicos. No entanto, atividades antropogénicas têm alterado as concentrações, com consequências para a flora e fauna presentes nos estuários.

O estuário do Sado situa-se a cerca de 40 km a Sul do estuário do Tejo, pertencendo à Bacia Hidrográfica do Sado. O estuário possui uma área total de cerca 23560 ha, uma área inundada de cerca de 150 km^2, e uma profundidade média de 10 m. O canal de Alcácer (vulgo rio Sado), apesar de ser a entrada principal de água doce no sistema, apresenta um fluxo baixo e sazonalmente variável, resultando num estuário influenciado predominantemente pela maré (Biguino *et al*., 2021). No estuário confluem várias pressões, desde urbanas, industriais e de lazer, assim como dragagens recorrentes devido aos acessos ao porto, incluindo também interesses naturais, culturais e científicos. De modo a equilibrar estas componentes, o estuário foi declarado Reserva Natural em 1980.

Existem poucos estudos publicados sobre metais em águas e sedimentos do estuário do Sado. Desde os primeiros artigos de Vale e Sundby (1982), Quevauviller *et al*. (1989) e Cortesão e Vale (1995), no séc. XXI os sedimentos foram analisados isoladamente por Caeiro *et al*. (2005), Freitas *et al*. (2008) e Moreira *et al*. (2009), as águas por Cabrita *et al*. (2020), e o mercúrio (Hg) em águas e sedimento por Lillebø *et al*. (2011). Assim, o recurso à base de dados do Instituto Hidrográfico (IH) feita a partir de dados do projeto POLSADO (1986-2010) permitirá uma visão de longa escala temporal, proporcionando uma avaliação das variações nas concentrações de metais mais consistente.

2. METODOLOGIA

Entre Março de 2018 e Junho de 2020 foram colhidas amostras de água e de sedimentos em sete estações no estuário do Sado, no âmbito do Projecto AQUASADO. Ao todo foram efetuadas treze campanhas para as amostras de água e quatro para os sedimentos. Das quatro campanhas de sedimentos, três (Out/2018, Set/2019, Fev/2020) amostraram algumas das mesmas estações que as de água, e noutra campanha (Maio/2018) foram colhidas 35 amostras ao longo dos canais de Alcácer e Marateca e estuário do Sado. As amostras de água foram colhidas com garrafas *Niskin* de 8 L a profundidades inferiores a 1 m em condições de preia-mar e marés mortas. Os sedimentos superficiais da campanha de Maio/2018 foram colhidos com uma draga *van Veen*, enquanto nas outras três campanhas foram colhidos com uma draga *Petit Ponar*.

Os metais analisados foram o alumínio (Al), cádmio (Cd), crómio (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), Hg, manganês (Mn), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn), e o semimetal arsénio (As) por espectrometria de absorção atómica, com exceção do Hg que foi analisado pela técnica de vapor frio (água) e por combustão (sedimentos). As análises decorreram na Divisão de Química e Poluição do Meio Marinho do IH.

3. RESULTADOS

3.1. Águas

Os valores de média anual (AA) e valor máximo admissível (MAC) da maioria dos metais não ultrapassaram os valores de referência ambiental definidos pela CE (2008), UE (2013) e APA (2016). As duas exceções foram o Cd cujos valores ultrapassaram o MAC de 0,45 µg/L definido pela CE (2008), e o Zn cujo valor médio anual (8,219 µg/L) ultrapassou o valor de 7,8 µg/L definido pela APA (2016) (Fig.).

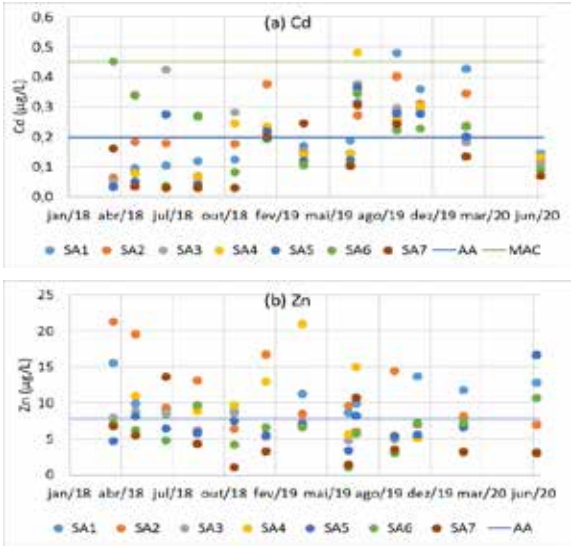


Fig. 1.: Concentrações de Cd (a) e Zn (b) na água. O traço AA corresponde ao valor de média anual e o traço MAC ao valor máximo admissível, definidos para cada metal.

Quanto aos valores médios de cada estação, notou-se uma diminuição das estações interiores (SA2, SA3, SA5) para as exteriores (SA6, SA7) (Fig. 1), particularmente no As, Cd, Cu, Ni e Zn (Fig. 1). A estação SA2 registou o valor médio mais elevado em todos os metais exceto no Pb.

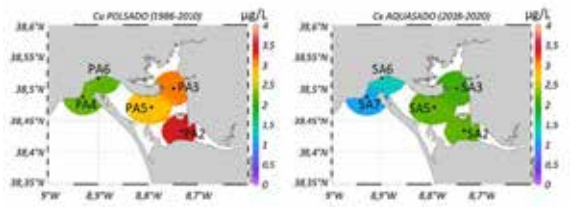


Fig. 1.: Valores médios de Cu em cada estação, dados históricos (1986-2010; à esquerda) e dados recentes (2018-2020; à direita).

Em comparação com os valores históricos (1986-2010), os valores médios de todos os metais decresceram no período 2018-2020, particularmente os de Pb, Fe e Hg, e o de As manteve-se semelhante. Quanto às médias obtidas em cada estação, os valores observados mais recentemente revelaram-se mais homogéneos ao longo do estuário que nos dados históricos, cujas diferenças eram mais acentuadas.

3.2. Sedimentos

3.2.1. Campanhas 2018-2020

De 2019 para 2020 houve um aumento na percentagem de areia nas estações SA1 e SA5, e uma consequente redução da fração mais fina constituída por silte e argila. No entanto, na SA1 a fração mais fina continuou maioritária, enquanto na SA5 passou a ser minoritária. Já na SA4, apesar do decréscimo na percentagem de areia de cerca de 20%, esta manteve-se predominante. A SA2 apresentou uma percentagem maioritária de silte e argila, e as percentagens de cascalho e areia semelhantes entre si (Fig. 2).

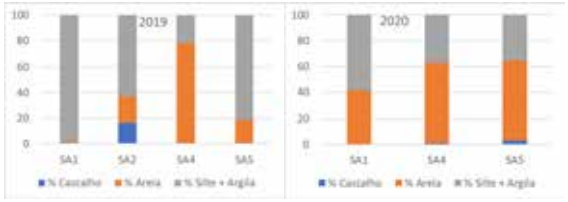


Fig. 2.: Granulometria das amostras de sedimento de 2019 e 2020.

De um modo geral, as estações SA1 e SA5 registaram um incremento nas concentrações de metais de 2018 para 2019, tendo em 2020 regressado a valores semelhantes a 2018. Os aumentos foram mais pronunciados no As, Cu na SA5 (Fig. 3), Pb e Zn. As exceções a esta generalização foram o Cd, Mn e Zn na SA1, cujos valores subiram consecutivamente entre 2018 e 2020.

Classificando as amostras de acordo com o seu grau de contaminação segundo a Portaria n.º 1450/2007, a maioria das amostras encontra-se nas Classes 1 (limpo) e 2 (contaminação vestigiária). As amostras de Cr na SA1 e As, Pb e Zn na SA5 em 2019 foram classificadas com Classe 3 (ligeiramente contaminado), Cu na SA5 em 2018 com Classe 4 (contaminado), e Cu na SA5 em 2019 com Classe 5 (muito contaminado) (Fig. 3).

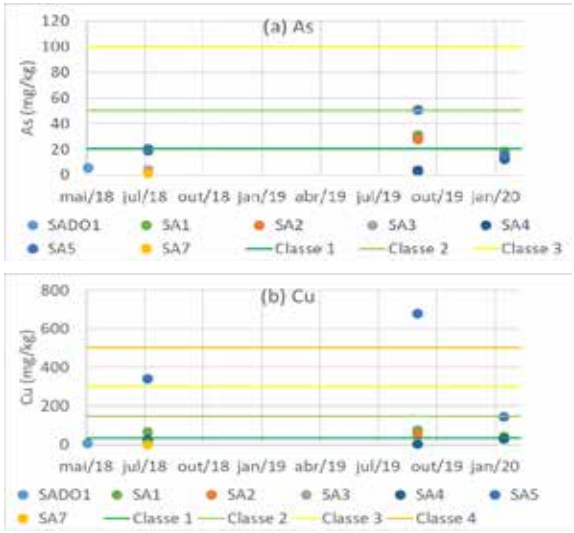


Fig. 3.: Concentrações de As (a) e Cu (b) nos sedimentos. As classificações de sedimentos de acordo com o grau de contaminação seguem os valores da Portaria n.º 1450/2007.

3.2.2. Campanha de Maio/2018

A granulometria das amostras de sedimento variou ao longo do estuário. As estações SADO3, SADO8-SADO13, SADO16, SADO25 e SADO31-SADO33 apresentaram percentagens de silte e argila, a fração mais fina, superiores a 90% (Fig. 4). Quanto à matéria orgânica e Al, há uma sobreposição das zonas com maiores percentagens, em particular a jusante do canal de Alcácer e a montante do canal da Marateca, enquanto as menores percentagens encontram-se na bacia do estuário (Fig. 5).

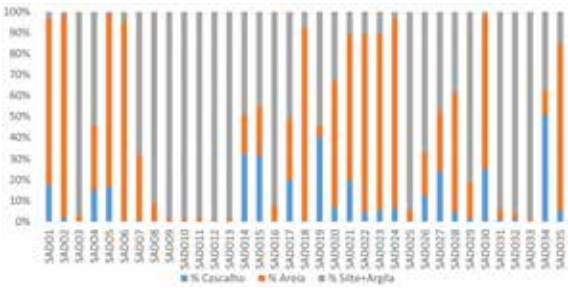


Fig. 4.: Granulometria das amostras de sedimento de Maio/2018.

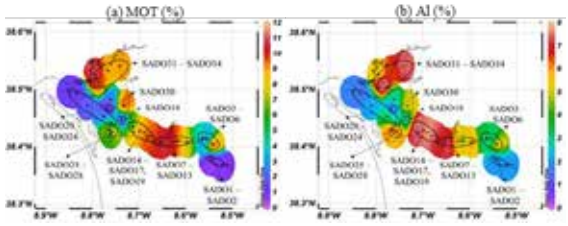


Fig. 5.: Distribuição das percentagens de matéria orgânica (a) e de Al (b) no estuário do Sado.

Quanto às concentrações de metais, de um modo geral os canais de Alcácer e Marateca apresentaram as maiores concentrações, e as menores encontraram-se na bacia do estuário. No canal de Alcácer há três estações que apresentam os valores mais elevados para a maioria dos metais: SADO7, SADO10 e SADO16. Esta distribuição coincide com as de matéria orgânica e Al vistas anteriormente. O Cr, Fe e Ni foram os únicos metais que apresentaram maiores concentrações de forma consistente ao longo dos canais de Alcácer e Marateca, e foram os três elementos com as correlações mais altas com Al ($r^2 > 0,8$; Fig. 6(a)), enquanto para os restantes metais as maiores concentrações foram registadas em pelo menos uma das três estações referidas previamente, resultando em correlações com Al mais variáveis ($0,1 < r^2 < 0,7$; Fig. 6(b)).

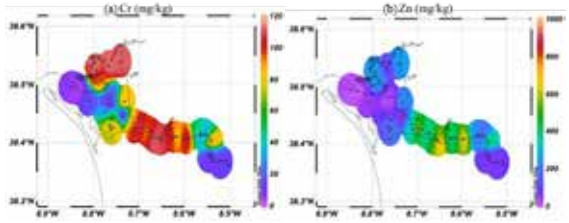


Fig. 6.: Concentrações de Cr (a) e Zn (b) nos sedimentos do estuário do Sado.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A tendência de menores concentrações de metais na água das estações mais interiores para as mais exteriores pode-se dever ao efeito de diluição por ação da maré. No entanto, a mistura de metais com água salina pode resultar noutros processos como adsorção/desorção, precipitação, assimilação (Chapman e Wang, 2001). Miranda *et al*. (2021) corroborou estudos anteriores em que o aumento de salinidade promove a dissolução de metais, e concluiu que o fósforo particulado e dissolvido têm um papel preponderante na adsorção/desorção de metais nos sedimentos. Nascimento *et al*. (2021) verificou que as concentrações de fósforo dissolvido eram inferiores e a salinidade consistentemente mais elevada nas estações mais exteriores em comparação com as interiores. Assim, a origem dos metais na zona mais exterior não serão os sedimentos mas resultado de transporte das zonas interiores do estuário. Biguino *et al*. (2021) verificou que existe um fluxo no sentido do oceano nos primeiros 15 m da coluna de água.

Quanto aos sedimentos, o incremento nas concentrações de 2018 para 2019 pode dever-se à alteração da granulometria dos sedimentos. A elevada percentagem de sedimentos mais finos é uma das condições necessárias para os metais serem adsorvidos pelos sedimentos (Freitas *et al*., 2008), condição essa verificada nas estações onde o aumento das concentrações foi mais notório.

A origem dos metais no estuário do Sado mais frequentemente referida é a exploração mineira na região hidrográfica, onde se situa a Faixa Piritosa Ibérica (Caeiro *et al.*, 2005; Freitas *et al*., 2008; Mil-Homens *et al*., 2014). Outras origens antropogénicas incluem as indústrias de papel e derivados, estações de combustão e térmicas, a lama resultante do tratamento de águas residuais, atividades portuárias como pintura e limpeza de navios (APA, 2016), e produção e uso de produtos químicos como fertilizantres e pesticidas (Caeiro *et al.*, 2005; Freitas *et al.*, 2008; Moreira *et al.*, 2009). Os valores registados foram da mesma ordem de grandeza de estudos anteriores feitos no estuário do Sado (Caeiro *et al*., 2005; Lillebø *et al*., 2011; Cabrita *et al*., 2020).

Recorreu-se aos valores internacionais de *Average Shale* (Salomons e Förstner, 1984) para análise de factores de enriquecimento. A estação SA5 das campanhas anuais de 2018-2020 apresentaram consecutivamente um enriquecimento baixo a moderado, e um enriquecimento elevado de Cu em 2019. Comparando com os valores de referência da OSPAR (2008, 2014), a SA5 apresentou o maior número de amostras acima do *Background value* e do EAC-*High* na maioria dos metais.

Comparando com dados históricos (1986-2010), os metais analisados têm demonstrado uma estabilização dos valores que já vinha dos últimos

anos da série histórica. A construção de estações de tratamento de águas residuais, a interceção e tratamento destas águas tem sido vista como uma das causas para a melhoria da qualidade da água em Portugal (Rosa *et al*., 2012), assim como a implementação de programas de monitorização com vista à melhoria do estado ambiental no contexto da Diretiva Quadro da Água.

Agradecimentos
O projeto AQUASADO (MAR-02.01.91-FEAMP-0051REF) foi financiado pelo programa operacional Mar2020.

REFERÊNCIAS

APA – Agência Portuguesa do Ambiente (2016). Plano de Gestão de Região Hidrográfica: Região Hidrográfica do Sado e Mira (RH6).

Biguino, B., Sousa, F., Brito, A.C. (2021). Variability of currents and water column structure in a temperate estuarine system (Sado estuary, Portugal). *Water*, 13(2), 187.

Cabrita, M. T., Brito, P., Cacador, I., Duarte, B. (2020). Impacts of phytoplankton blooms on trace metal recycling and bioavailability during dredging events in the Sado estuary (Portugal). *Marine Environmental Research*, 153, 104837.

Caeiro. S., Costa. M.H., Ramos. T.B., Fernandes. F., Silveira. N., Coimbra. A., Medeiros. G., Painho. M. (2005). Assessing heavy metal contamination in Sado Estuary sediment: An index analysis approach. *Ecological Indicators*. 5, 151–169.

Chapman, P.M. e Wang, F. (2001). Assessing sediment contamination in estuaries. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 20(1), 3-22.

Comunidade Europeia (2008). Directiva 2008/105/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro de 2008. Jornal Oficial da União Europeia. L 348/84. 14 pp.

Comunidade Europeia (2013). Diretiva 2013/39/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 12 de agosto de 2013. Jornal Oficial da União Europeia. L 226/1. 17 pp.

Cortesão, C. e Vale, C. (1995). Metals in sediments of the Sado estuary, Portugal. *Marine Pollution Bulletin*, 30(1), 34-37.

Freitas. M.C., Andrade. C., Cruces. A., Munhá. J., Sousa. M.J., Moreira. S., Jouanneau. J.M., Martins. L. (2008). Anthropogenic influence in the Sado estuary (Portugal): a geochemical approach. *Journal of Iberian Geology*. 34(2), 271-286.

Lillebø. A.I., Coelho. P.J., Pato. P., Válega. M., Margalho. R., Reis. M., Raposo. J., Pereira. E., Duarte. A.C., Pardal. M.A. (2011). Assessment of mercury in water, sediments and biota of a southern European estuary (Sado estuary. Portugal). *Water, Air, & Soil Pollution*. 214(1-4), 667-680.

Mil-Homens, M., Vale, C., Raimundo, J., Pereira, P., Brito, P., Caetano, M. (2014). Major factors influencing the elemental composition of surface estuarine sediments: the case of 15 estuaries in Portugal. *Marine Pollution Bulletin*, 84(1-2), 135-146.

Miranda, L. S., Wijesiri, B., Ayoko, G. A., Egodawatta, P., Goonetilleke, A. (2021). Water-sediment-interactions and mobility of heavy metals in aquatic environments. *Water Research*, 202, 117386.

Moreira. S., Freitas. F.C., Araújo. M.F., Andrade. C., Munhá. J., Fatela. F., Cruces. A. (2009). Contamination of Intertidal Sediments – The Case of Sado Estuary (Portugal). *Journal of Coastal Research. Special* 56, 1380-1384.

Nascimento, Â., Biguino, B., Borges, C., Cereja, R., Cruz, J.P.C., Sousa, F., Dias, J., Brotas, V., Palma, C., Brito, A.C. (2021). Tidal variability of water quality parameters in a mesotidal estuary (Sado Estuary, Portugal). *Scientific Reports*, 11(1), 1-17.

OSPAR Commission (2008). Co-ordinated Environmental Monitoring Programme-Assessment manual for contaminants in sediments and biota. OSPAR Commission. 39 p.

OSPAR Commission (2014). Levels and trends in marine contaminants and their biological effects – CEMP Assessment report 2013. OSPAR Commission, 23 pp.

Quevauviller, P., Lavigne, R., Pinel, R., Astruc, M. (1989). Organo-tins in sediments and mussels from the Sado estuarine system (Portugal). *Environmental Pollution*, 57(2), 149-166.

Rosa, M.J., Silva, C., Ramalho, P., Alegre, H. (2012). Avaliar para melhorar o desempenho das estações de tratamento de água e de águas residuais. *Atas das Jornadas de Investigação e Inovação LNEC– Cidades e Desenvolvimento*.

Salomons, W.e Förstner. U. (1984). Metals in the Hydrocycle. Springer-Verlag. 359 pp.

Vale, C. e Sundby, B. (1982). A survey of the elemental composition of bottom sediments in the Sado estuary. In *Actual problems of oceanography in Portugal.* 189-200.

Microplastic pollution in the northern Portuguese coast: Preliminary results from the i-Plastic project

E. Valente (1,2), C. Palma (3) A. Guilherme (4), F. Bessa, (5), P. Sobral (4)

(1) Division of Marine Geology, Instituto Hidrográfico, Lisbon, Portugal. elisabete.valente@hidrografico.pt

(2) Faculty of Sciences of the University of Lisbon, Lisbon, Portugal

(3) Divisão de Química e Poluição do Meio Marinho, Instituto Hidrográfico, Lisboa Portugal

(4) MARE - Marine and Environmental Sciences Centre, NOVA School of Science and Technology, NOVA University, Lisbon, Portugal

(5) Department of Life Sciences of the Marine and Environmental Sciences Centre in the University of Coimbra, Coimbra, Portugal

Abstract: The present work presents the first results of the analysis of water and sediment samples collected in September 2020, and April and November 2021 in the northern Portuguese coast. This analysis performed under the scope of the i-plastic project aiming to understand and predict the dispersion, accumulation, and impacts of microplastics (MPs) and nanoplastics (NPs) in marine environment from tropical and temperate land-ocean interface to the open ocean. Preliminary results show the presence of MPs, although its quantities seem to have a seasonal influence. Water samples show more polymers than sediment samples, and most polymers found are fibers.

Keywords: Atlantic Ocean, Mondego, polymers, sediment samples, water samples

1. INTRODUCTION

The i-Plastic project aims to study the microplastic (MP) and nanoplastic pollution at the land-ocean interface and understand its dispersion routes into the open ocean.

Since 2020, three sampling campaigns have taken place under the scope of this project, where sediment and water samples were collected along the NW Portuguese coast, high sea and in the Mondego estuary. This work includes the quantity and characteristics of the MP polymers found.

2. DATA AND METHODS

Three sampling campaigns took place in the NW Portuguese coast (between Ovar and Vieira de Leiria; Fig. 1) in September 2020, April 2021, and November 2021, on board NRP Almirante Gago Coutinho and NRP Andromeda cruises. Sediment samples were collected with a Smith-McIntyre grab, and water samples with a neuston net tow 150 µm (surface) and a conical plankton net 150 µm (water column). The nets were washed, with a hose, and this water was stored as a blank filed every morning before the sampling. In total, 376 oceanic samples were collected.



Fig. 1. Map of Portugal with the area (marked with a yellow line) where sampling was performed.

In April 2021, the Mondego estuary was sampled in four sites (Fig. 2). The data from the Mondego was then compared with data from the adjacent coast.



Fig. 2. Map with sampling sites in the Mondego estuary (on the right) and adjacent coastal water (on the left).

Sediment samples were sieved and the fraction <5 mm was dried (lyophilisation), and a subsample of 50g of each sample was digested (H_2O_2 10 % for 72 h). Once digested, samples were sieved and the fraction >50 µm added to a NaCl (200 ml) saturated solution (~1.2 g/ml). This solution was then filtered (glass fibre filter1.2 µm).

Water samples were sieved and the fraction >50 µm was digested (KOH 10 % for 72 h) and filtered (polycarbonate filter 12 µm).

The samples were then analysed with a stereomicroscope Leica (MZ 16 F) and the particles found were isolated on a paper substrate. Finally, these particles were analysed with a microscopic system accoupled with a spectrometer µ-FTIR spectrometer Spotlight 200i Microscope System, equipped with a MCT detector (Perkin Elmer). The infra-red spectrums were acquired between 4000 cm^{-1} and 600 cm^{-1}, in reflectance mode, with 1 cm^{-1} data interval, and 4 cm^{-1} resolution and 8 scans. The background signal was obtained for each set of particles analysis. The polymers found were classified according with shape, size, and colour.

Nitrile gloves and laboratory coat have been used to handle samples, and instruments and surfaces were clean before the analysis of each sample to avoid cross contamination.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Within the oceanic samples collected, 95 samples were analysed. Most MP particles found are black fibers, except for the samples from November 2021 where most particles are red PP fibers/fragments (Fig. 3 and Fig. 4).

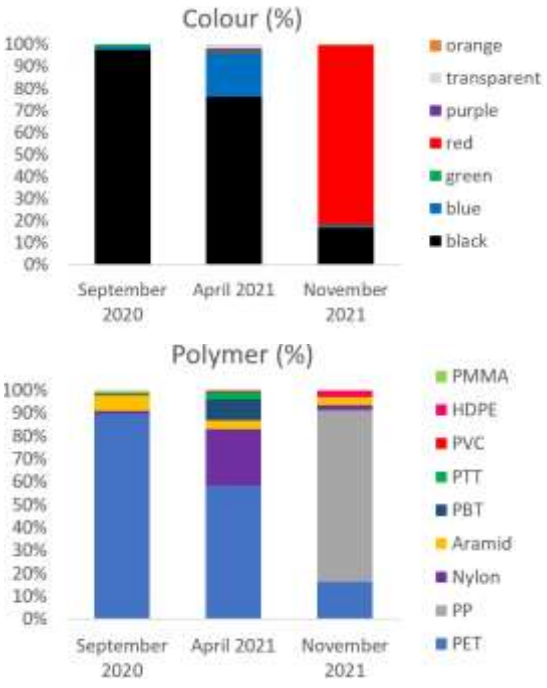


Fig. 3. Percentages of polymer colours (up) and polymer type (down) found per sampling campaign.

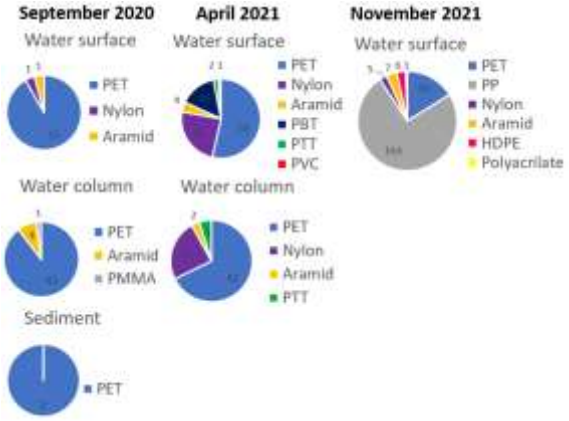


Fig. 4. Number and type of polymers found per campaign and sampling matrix.

In general, PET is the most common polymer across all the campaigns. PET is used in synthetic fabric, which may be derived from sewage treatment plants discharges (Lu et al., 2021).

The black and blue fibres found may be related to the clothes worn when sampling as these had the same colour and were also present in the field blanks (Table. i).

Table. i. Polymers frequency, type, colour, and average size in the field blanks from April and November 2021.

Field blanks		
Campaign	04/2021	11/2021
Sample type	Water surface	Water surface
Number of samples	1	3
Number of polymers	8	10
Polymers	PET, PTT, aramida	PET, PP
Average size (mm)	1.1	0.5
Colours	black	black, blue, red

3.1 Samples from September 2020

The water samples from the surface showed 24 MPs (1.0 MP m^{-3}) in total; 22 PET (0.1 MP m^{-3}), 1 aramid (0.0 MP m^{-3}) and 1 nylon (0.0 MP m^{-3}) (Fig. 4). The colours found were black and blue (Fig. 3). The average size of these particles is 0.8mm.

Samples from the water column showed 48 MPs (9.6 MP m^{-3}); 43 PET (0.7 MP m^{-3}), 4 aramid fibers (0.1 m^{-3}) and 1 green fragment of PMMA (0.0 m^{-3}) (Fig. 4). The average size of these particles is 0.4 mm.

From the sediment samples only 2 samples had MPs: one black PET fibre each (20 MP Kg^{-3}) (Fig. 4).

The most frequent polymer in this campaign is PET (91 %) and the least frequent is nylon (1 %) and PMMA (1 %) (Fig. 3).

3.2 Samples from April 2021

Within the water surface samples 92 fibers were found (6.4 MP m^{-3}); 24 nylon (0.1 MP m^{-3}), 53 PET (0.2 MP m^{-3}), 4 aramid (0.0 MP m^{-3}), 1 PVC (0.0 MP

m^{-3}), 15 PBT (0.0 MP m^{-3}) and 2 PTT (0.0 MP m^{-3}) (Fig. 4). The colours found were black, blue, red, and transparent (Fig. 3) and the average particle size is 0.9.

Samples from the water column displayed 62 particles (6.0 MP m^{-3}); 15 nylon (0.1), 42 PET (0.2 MP m^{-3}), 2 aramid (0.0 MP m^{-3}), 3 PTT (0.0 MP m^{-3}) (Fig. 4). The colours found were black, blue, and transparent (Fig. 3) and the average particle size is 1.1mm.

The field blank (surface) showed 8 particles of black PET, PTT, and aramid with average size of 1.1 mm (Table. i).

The most common polymer was PET (58 %) and the least frequent PVC (1 %) (Fig. 3).

Results from the Mondego estuary show higher concentrations of MPs in the water column than at the surface (Fig. 5), which could be due to the density of the particles be matching that of the water. Polymers less dense than water tend to float, while those which are denser will sink and become more available in sediments (GESAMP, 2015). Moreover, properties of plastic particles (size, density, shape etc.) may change due to physical, chemical, and biological processes, influencing their distribution (GESAMP, 2015).

Concentrations in the estuary are higher when compared with adjacent open sea sites (Fig. 6) probably because it is closer to the source of plastic pollution. Rivers, especially those close to cities, are considered the main land source of MP in the ocean (Eerkes-Medrano et al., 2015). Rivers can also be a reservoir for the accumulation of MPs before they reach the ocean (Xu et al., 2020).

Sites with higher concentration of MPs are near wastewater treatment plant outlets, which could be the source of these MPs. Most polymers found were fibers and fragments of PET and nylon, and blue was the most common colour (Fig. 7).

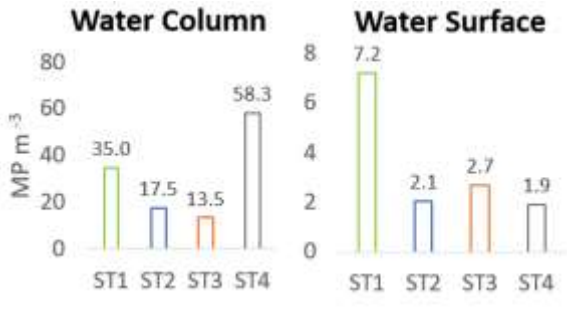


Fig. 5. MPs in the water column and water surface in the estuary sampling sites (ST1, ST2, ST3 and ST4).

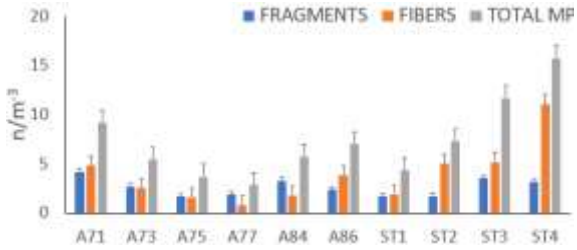


Fig. 6. Concentration of MPs in Mondego estuary and adjacent open sea water (April 2021).

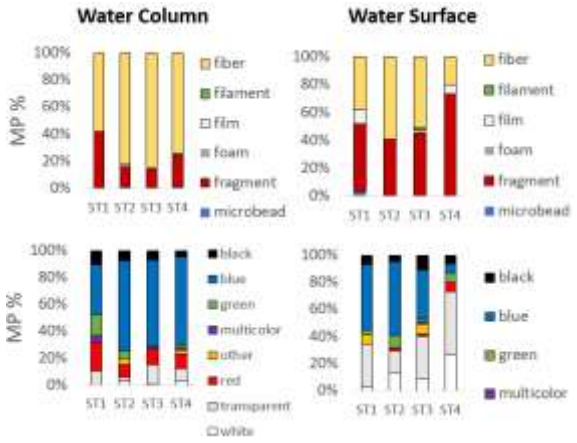


Fig. 7. Polymer shapes and colours (%) found in the estuarine samples (ST1, ST2, ST3 and ST4) in April 2021.

3.3 Samples from November 2021

Within the oceanic surface samples analysed, 220 MPs were found (8.4 MP m^{-3}); 153 PP (0.2 MP m^{-3}), 33 PET (0.0 MP m^{-3}), 6 PE (0.0 m^{-3}), 7 aramid (0.0 m^{-3}), 5 nylon (0.0 m^{-3}) and 1 polyacrylate (0.0 m^{-3}) (Fig. 4). PP and PE are produced around the world and widely used in package and hygiene products (Han et al., 2018). The colours found were red, black, blue, and transparent (Fig. 3) and the average particle size is 1.3 mm. The field blanks showed 10 particles of PET and PTT (black, blue, and red) and the average particle size of these particles is 0.5 mm (Table. i).

The only shapes found within the oceanic samples were fibres and fragments, which are the most common polymer shapes found in the oceans (Lusher et al., 2014; Moore et al., 2001; Thompson et al., 2004).

The most frequent colours were black and red, but according with previous studies, the most common polymer colours found in water samples are transparent (35%), white (21,8 %) and blue (16,7 %) (Lu et al., 2021).

Samples from November 2021 had more polymers than samples from the previous campaign which may be explained by the meteorological conditions at the time, as the Atlantic was hit by a storm and storms are known as a source of MPs dispersion (Lambert & Wahner, 2018).

4. CONCLUSIONS

A variety of polymers have been found (PET, nylon, aramid, PP, PBT, PTT, HDPE, polyacrylate, PVC, PMMA), and most water samples had MPs.

In the oceanic samples, the predominant polymer shape found was fibre and the most common colours were black and dark blue, suggesting a possible contamination from clothes worn during sampling.

Samples from November 2021 had a higher concentration of MPs (8.4 MP m^{-3}), mostly red PP which could be explained by storm conditions of the sea at the time, facilitating the entrance and dispersion of plastic detritus in the sea.

The size of polymers found ranges from 0.1 mm to 4.7 mm, and the average size is 1mm.

Mondego estuary shows a higher concentration of MPs when compared with the adjacent coastal water probably due to the proximity to the source of plastic pollution (land source).

In the Mondego most MPs can be found in the water column, which could be due their density. MPs tend to change their characteristics over time, allowing them to enter the water column and eventually sink.

Acknowledgements
Data acquisition and processing was funded by JP-Oceans and Fundação para a Ciência e a Tecnologia-FCT through the i-Plastic project.

REFERENCES

Eerkes-Medrano, D., Thompson, R. C., & Aldridge, D. C. (2015). Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs. Water Research, 75, 63–82. https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.012.

GESAMP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. (2015). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment". Reports and Studies GESAMP, 90, 96. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3803.7925.

Han, J.-W., Ruiz-Garcia, L., Qian, J.-P., & Yang, X. (2018). Food Packaging: A Comprehensive Review and Future Trends. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *17*, 860–877. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12343.

Lambert, S., & Wagner, M. (2018). Microplastics Are Contaminants of Emerging Concern in Freshwater Environments: An Overview BT - Freshwater Microplastics: Emerging Environmental Contaminants? In M. Wagner & S. Lambert (Eds.) (pp. 1–23). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61615-5_1

Lu, H.-C., Ziajahromi, S., Neale, P. A., & Leusch, F. D. L. (2021). A systematic review of freshwater microplastics in water and sediments: Recommendations for harmonisation to enhance future study comparisons. Science of The Total Environment, 781, 146693. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146693

Lusher, A. L., Burke, A., O'Connor, I., & Officer, R. (2014). Microplastic pollution in the Northeast Atlantic Ocean: Validated and opportunistic sampling. Marine Pollution Bulletin, 88(1), 325–333.

Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K., & Weisberg, S. B. (2001). A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. Marine Pollution Bulletin, 42(12), 1297–1300. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X

Relvas, P., & Barton, E. D. (2002). Mesoscale patterns in the Cape São Vicente (Iberian Peninsula) upwelling region. *J. Geophys. Res*, *107*. https://doi.org/10.1029/2000JC000456

Thompson, R., Olsen, Y., Mitchell, R., Davis, A., Rowland, S., John, A., … Russell, A. (2004). Lost at Sea: Where Is All the Plastic? Science (New York, N.Y.), 304, 838. https://doi.org/10.1126/science.1094559

Xu, Q., Xing, R., Sun, M., Gao, Y., & An, L. (2020). Microplastics in sediments from an interconnected river-estuary region. Science of The Total Environment, 729, 139025. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139025

PAHs em sedimentos superficiais em estuários e no litoral continental português

R. Gaspar (1), A. Rocha (1), C. Palma (1), M. Eusébio (2)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. raquel.gaspar@hidrografico.pt.

(2) LAQV, REQUIMTE, Departamento de Química, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516, Caparica, Portugal.

Resumo: Os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) são contaminantes presentes no meio ambiente que, dada a sua persistência e as suas propriedades carcinogénicas e mutagénicas, compelem a efetuar a devida monitorização no meio marinho. Este estudo pretende efetuar uma avaliação dos teores e fontes de PAHs em sedimentos superficiais, recolhidos em quatro estuários e cinco áreas da costa continental portuguesa, e insere-se no âmbito do projeto AQUIMAR, cujo objetivo principal é efetuar uma avaliação da viabilidade na introdução de novas espécies e dos locais mais adequados para a prática da aquicultura. Dos resultados obtidos pode-se destacar que, para a generalidade dos pontos amostrados, os PAHs são de origem pirogénica. Assim o somatório de PAHs obtido foi, 1110 µg/kg para Sagres/Tavira, 1090 µg/kg para o estuário do Sado, 512 µg/kg para a ria Formosa, 419 µg/kg na ria de Aveiro, 209 µg/kg em Setúbal/Sines, e por fim, 34,2 µg/kg no rio Mira.

Palavras-chave: cromatografia gasosa-espetrometria de massa, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, sedimentos.

1. INTRODUÇÃO

O meio marinho representa uma grande parte da biosfera, sendo este considerado uma fonte importante de recursos energéticos, alimentares e minerais. Assim, deverá ter-se em conta que a introdução de contaminantes no meio marinho tem uma repercussão ecológica de elevada importância, podendo causar desequilíbrio dos ecossistemas marinhos (Lubecki e Kowalewska, 2010). O consumo de pescado e afins nas últimas décadas tem apresentado um acentuado incremento, pelo que, de forma a satisfazer esta procura, recorre-se à prática de aquicultura (Oliveira *et al.,* 2020). Muitos estudos demonstram preocupações relacionadas com a presença de contaminantes em ambientes marinhos, como microplásticos, metais, pesticidas organoclorados, dioxinas, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), entre outros (Netto *et al*., 2000). Estes compostos podem ser incorporados na dieta humana, tornando relevante a determinação e identificação da origem destes contaminantes (Oliveira *et al.,* 2020).

Os PAHs são contaminantes orgânicos constituídos por menos dois anéis benzénicos condensados. Apresentam também uma grande propensão para se acumular nos tecidos dos organismos vivos e nos sedimentos, onde persistem por longos períodos de tempo (Lubecki e Kowalewska, 2010). As suas características mutagénicas e carcinogénicas levaram a que 16 PAHs existentes no meio ambiente fossem considerados como substâncias prioritárias pela *United States Environmental Protection Agency* (US EPA). Após a deteção das mesmas características anteriormente descritas, em células somáticas de animais experimentais in vivo foi elaborada a lista de PAHs considerados prioritários pela União Europeia.

Os PAHs podem ser categorizados quanto ao modo como entram nos ecossistemas, o que se revela importante para controlo das suas fontes emissoras (Oliveira *et al.,* 2020). Assim os PAHs podem ser de: (a) fonte natural, resultantes da ação da natureza (*e.g.,* jazidas de petróleo, incêndios, atividade vulcânica) ou de (b) fonte antropogénica, decorrente da atividade humana (*e.g.*, tráfego automóvel, indústrias, queima de resíduos ou biomassa) (Lubecki e Kowalewska, 2010). Estes compostos podem ainda ser classificados quanto à sua origem: (a) biogénica e diagenética, ou seja, originados por microrganismos, plantas e algas, ou no decorrer de alterações da matéria orgânica lentas, respetivamente, ou (b) petrogénica, gerados no decurso da formação do petróleo ou (c) pirogénica, formados por processos de combustão incompleta (Stogiannidis e Laane, 2015).

O presente estudo visa a avaliação do nível de contaminação em PAHs dos sedimentos de várias áreas oceânicas e estuarinas portuguesas (considerando a Portaria n.º 1450/2007 de 12 de novembro), assim como a identificação das suas principais origens. Os resultados obtidos, são um contributo na avaliação da viabilidade da prática de aquicultura nas diversas áreas estudadas, no âmbito do projeto AQUIMAR.

[1] (15 +1) PAHs considerados prioritários pela União Europeia: benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno, benzo(j)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(g,h,i)perileno, benzo(a)pireno, criseno, ciclopenta(c,d)pireno, dibenzo(a,h)antraceno, dibenzo(a,e)pireno, dibenzo(a,h)pireno, dibenzo(a,i)pireno, dibenzo(a,l)pireno, indeno(1,2,3-cd)pireno, 5-metilcriseno + benzo[c]fluoreno.

2. AMOSTRAGEM E MÉTODOS

As áreas de estudo incidiram em zonas com atividade antropogénica, como: Viana do Castelo/Porto (A), Aveiro/Figueira da Foz (B), Peniche (C), Setúbal/Sines (D), Sagres/Tavira (E), Ria Formosa (RF), Rio Mira (MI), Estuário do Sado (SA) e Ria de Aveiro (RA) (Figura 1). Os PAHs foram determinados nas amostras de sedimento, por Cromatografia Gasosa-Espectrometria de Massa segundo método interno do Instituto Hidrográfico (NT.LB.58). Foram determinados 19 PAHs[2]: 16 PAHs considerados prioritários pela US EPA (parâmetros acreditados) e mais três PAHs habitualmente estudados pelo laboratório. Foram usados como padrões misturas comerciais dos 16 PAHs US EPA e dos PAHs deutrados[3] usados como padrões internos (Sigma-Aldrich), assim como padrões sólidos para o BeP (Janssen Chimica) e o Per (Fluka).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Distribuição e fontes de PAHs

Pela observação da figura 1, pode-se referir que as áreas onde foram observados teores mais altos do somatório de 18 PAHs (Σ 18 PAHs; US EPA+Tph+BeP) foram a área de Sagres/Tavira e o estuário do Sado. As estações E110, SA5, SA5A e RF30 exibem os teores mais elevados para este parâmetro, variando de 1110 µg/kg bs a 512 µg/kg bs. Nas áreas A, B e C os teores de 18 PAHs encontram-se inferiores ao limite de quantificação do método (LOQ) em todos os sedimentos analisados (resultados não apresentados na figura 1). Os PAHs com 5 a 6

[2] Abreviatura e limite de quantificação (LOQ) apresentado entre parêntesis (expresso em base seca, bs): Naftaleno (N; 7,0 µg/kg bs), Acenaftileno (Acy; 7,0 µg/kg bs), Acenafteno (Ace; 7,0 µg/kg bs), Fluoreno (F; 7,0 µg/kg bs), Fenantreno (Phe; 7,0 µg/kg bs), Antraceno (A; 7,0 µg/kg bs), Fluoranteno (Fluo; 7,0 µg/kg bs), Pireno (P; 7,0 µg/kg bs), Benzo(a)antraceno (BaA; 13,0 µg/kg bs), Criseno&Trifenileno (Chr&Tph; 7,0 µg/kg bs), Benzo(b+k)fluorantenos (B(b+k)F; 27,0 µg/kg bs), Benzo(a)pireno (BaP; 13,0 µg/kg bs), Indeno(1,2,3-cd)pireno (Ind; 13,0 µg/kg bs), Dibenzo(a,h)antraceno (DBA; 13,0 µg/kg bs), Benzo(g,h,i)perileno (BghiP; 13,0 µg/kg bs), Benzo(e)pireno (BeP; 13,0 µg/kg bs) e Perileno (Per; 13,0 µg/kg bs); Tph, BeP e Per adicionais à listagem US EPA.

[3] Naftaleno-d8 (N-d8), Acenaftaleno-d10 (Ace-d10), Fenantreno-d10 (Phe-d10), Criseno-d12 (Chr-d12) e Perileno-d12 (Per-d12).

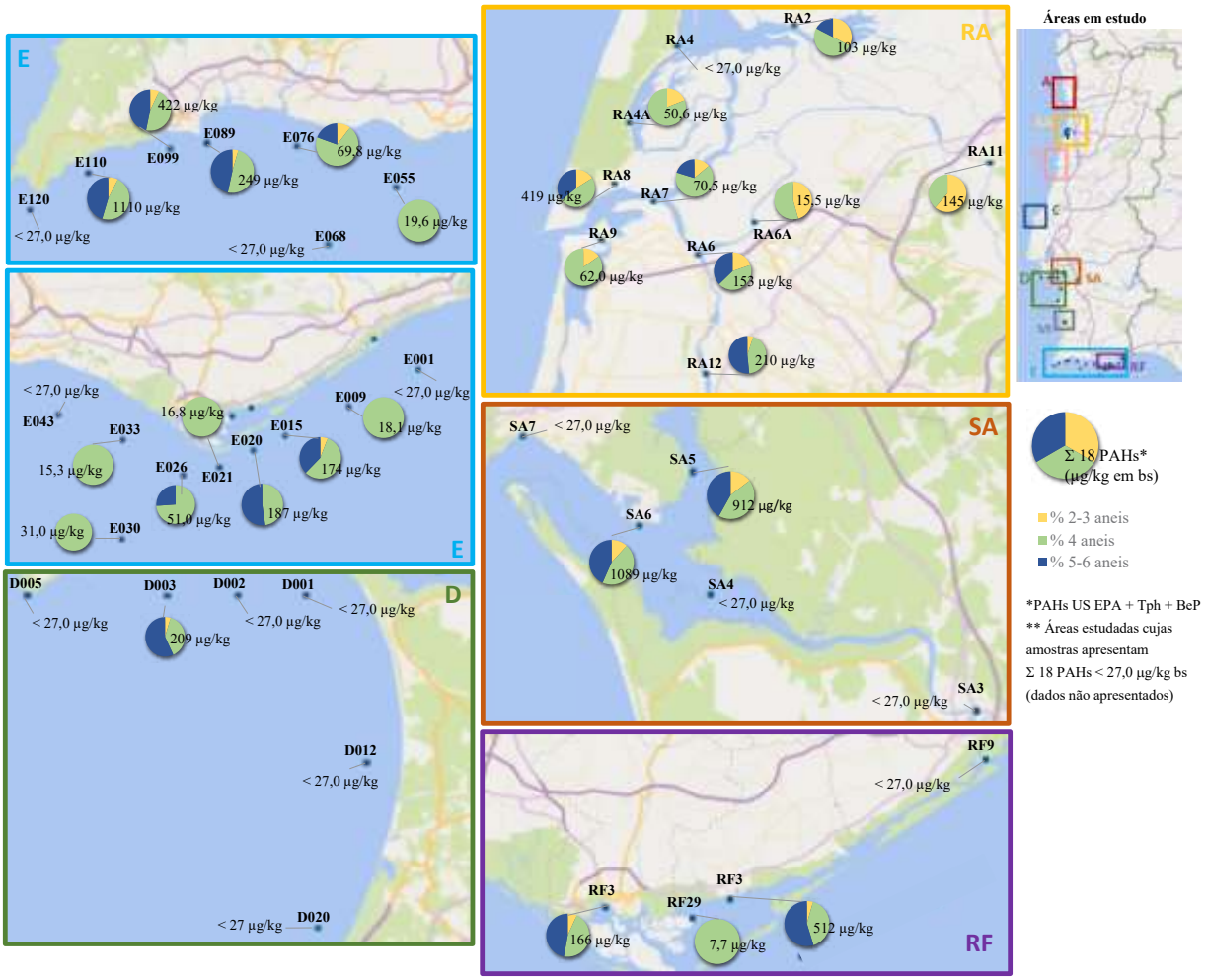


Fig. 1. Estações amostradas e distribuição de PAHs: ● Viana do Castelo/Porto (A) ● Ria de Aveiro (RA) ● Aveiro/Figueira da Foz (B) ● Peniche (C) ● Setúbal/Sines (D) ● Estuário do Sado (SA) ● Rio Mira (MI) ● Sagres/Tavira (E) ● Ria Formosa (RF). 2-3 anéis: N, Acy, Ace, F, Phe e A; 4 anéis:Fluo, P, BaA e Chr&Tph; 5-6 anéis: B(b+k)F, Bap, Ind, DBA, BghiP, BeP e Per.

anéis são, normalmente, encontrados com maior abundância em substâncias pirogénicas do que em substâncias petrogénicas, pois a sua formação é muito lenta (Stogiannidis e Laane, 2015). Observando a figura 1 verifica-se que em todas as estações há predomínio dos PAHs de 4 a 6 anéis, salvo para as estações RA11, RA9, RA4A, MI05 e RA6A onde a percentagem de PAHs de 2 a 4 anéis é prevalente. Considerando esta informação, os PAHs identificados são maioritariamente de origem pirogénica. Neste estudo foi também aferido que os PAHs mais abundantes nos sedimentos são o Fluo (< 7,0 µg/kg bs a 185 µg/kg bs), o P (< 7,0 µg/kg bs a 161 µg/kg bs) e o B(b+k)F (< 27,0 µg/kg bs a 107 µg/kg bs) (figura 2).

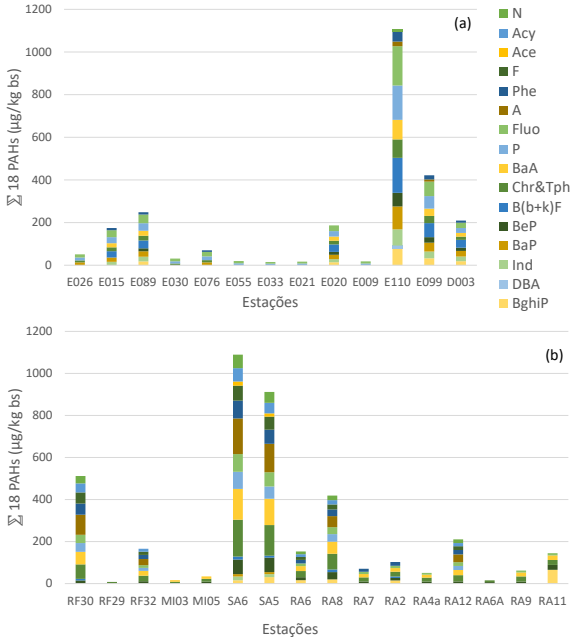


Fig. 2. Distribuição dos 18 PAHs estudados (16 US EPA + Tph + BeP) nas amostras de sedimentos oceânicos (a) e estuarinos (b). As estações não referidas apresentam os teores de PAHs < LOQ.

3.2. Razões de diagnóstico

Esta avaliação, utilizada para discriminar fontes de PAHs, é efetuada tendo em consideração PAHs com a mesma razão massa/carga de modo a reduzir diferenças de propriedades dos PAHs como a solubilidade, volatilidade e adsorção. A diferença entre calores de formação dos PAHs integrantes no cálculo da razão permite aferir o nível de discriminação entre fontes. Os compostos A, Fluo, BaA e Ind são menos estáveis, sendo estes obtidos a altas temperaturas por combustão incompleta (origem pirogénica) (Stogiannidis e Laane, 2015). Por outro lado, as fontes petrogénicas apresentam PAHs mais estáveis, como o Phe, P, Chr e BghiP, sendo estes controlados pelas propriedades termodinâmicas e gerados por processos a baixa temperatura. As razões mais utilizadas são A/(A+Phe), Fluo/(Fluo+P), BaA/(BaA+Chr) e Ind/(Ind+BghiP). Sendo que a razão A/(A+Phe) é útil para diferenciar entre fonte petrogénica e pirogénica, e as últimas três para discriminar entre fontes pirogénicas (Tobiszewski e Namieśnik, 2012).

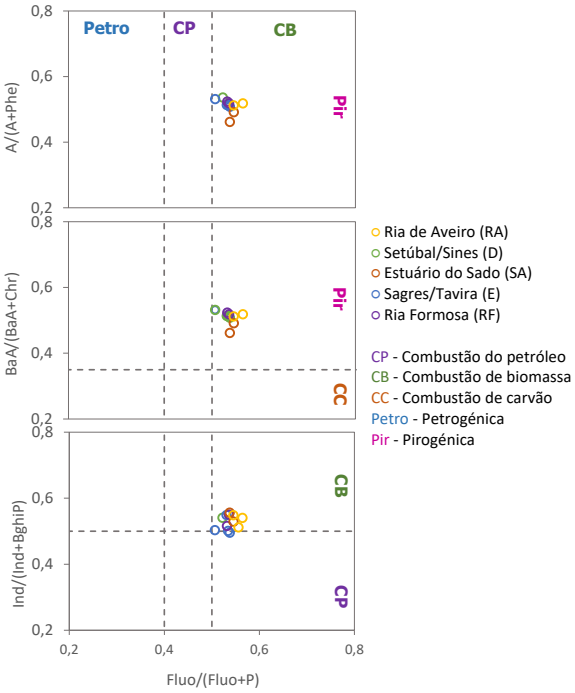


Fig. 3. Razões de diagnóstico e faixas limítrofes (diferenciação de fontes) (Tobiszewski e Namieśnik, 2012).

Na figura 3 podemos aferir que os processos de combustão são a principal fonte, corroborando o anteriormente referido. Ainda que a combustão de biomassa seja o processo mais evidente, é notório, para algumas estações na área de Sagres/Tavira um ligeiro contributo da combustão de petróleo.

3.3. Origem do perileno

O Per, de um modo geral, possui origem natural sendo produzido por diagénese, ainda que possa ser também gerado por processos de combustão ou estar simplesmente presente no petróleo (Stogiannidis e Laane, 2015). Para comprovar a sua origem, na figura 4 estão representadas as percentagens de Per relativamente ao total de PAHs contendo 5 anéis (Σ5-isómeros) e ao total de PAHs parentais analisados (Σ 18 PAHs).

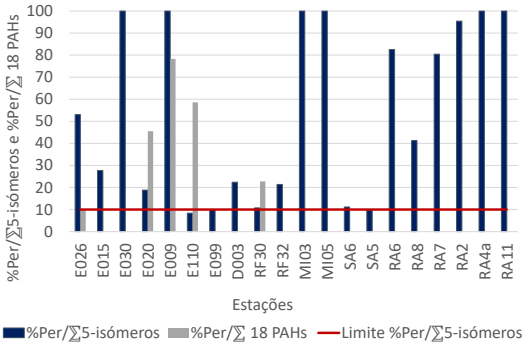


Fig. 4. Percentagem de perileno relativamente a Σ5-isómeros e a Σ 18 PAH; Σ5-isómeros - B(b+k)F, BeP, BaP, DBA e Per.

Os dados apresentados na figura 4 revelam que o Per é, para a maioria dos sedimentos, formado por

diagénese dado que a %Per/Σ5-isómeros excede o critério de 10% (Stogiannidis e Laane, 2015) excetuando-se as estações E099 (9,9%), E110 (8,4%) e SA5 (9,7%) para as quais é evidenciado uma contribuição pirogénica. Para contribuições pirogénicas a %Per/ Σ 18 PAHs varia entre 1% e 4%. Sendo encontradas %Per/Σ 18 PAHs inferiores a 4% para as estações E110 (2,8%), E099 (3,4%) e SA5 (3,1%), é corroborada a origem pirogénica do Per nestes sedimentos.

3.4. Avaliação do nível de contaminação

No presente estudo, os sedimentos das estações E110 da área de Sagres/Tavira, SA5A e SA5 do estuário do Sado, RF30 da ria Formosa e RA8 da ria de Aveiro estão classificados como "classe 2 – contaminação vestigiária", com o Σ18 PAHs entre 300-2000 µg/kg, (Portaria n.º 1450/2007 de 12 de novembro). Já para as restantes estações o nível de contaminação é de "classe 1 – material limpo", uma vez que o Σ18 PAHs é inferior a 300 µg/kg. Contudo, esta avaliação não deve ser vinculativa pois é meramente indicativa dado o campo de aplicação a que se destina a legislação empregue, *i.e.*, avaliação do nível de contaminação de material dragado.

Tabela. I. Comparação dos resultados obtidos com outro estudo.

Área	PAHs usados no estudo	Intervalo ΣPAHs (µg/kg bs)	Nº de anel predomimante	Referência
Estuário do Sado	Σ18 PAHs	912-1089	4-6 anéis	Presente trabalho
Ria Formosa	Σ18 PAHs	7,7-512	4-6 anéis	
Ria de Aveiro	Σ18 PAHs	15,5-419	2-3 anéis	
Rio Mira	Σ18 PAHs	16,2-34	4-6 anéis	
Ria de Aveiro	16 US EPA, BeP	123-781	4-6 anéis	Rocha e Palma (2019)
Estuário do Sado	16 US EPA, BeP	44-2237	4-6 anéis	Serafim *et al.* (2013)
Ria Formosa	16 US EPA, BeP	46-1998	4-6 anéis	
Ria de Aveiro	16 US EPA	15-26	2-3 anéis	
Rio Mira	16 US EPA	37-57	2-3 anéis	

Observando a tabela I, podemos verificar que os resultados de estudos anteriores são comparáveis aos obtidos no presente estudo.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo foram determinados PAHs em sedimentos recolhidos em cinco áreas costeiras de Portugal continental e quatro estuários. Com os dados obtidos identificaram-se as fontes de PAHs e efetuou-se uma avaliação do grau de contaminação dos sedimentos. As características da distribuição de PAHs permitiram averiguar que, na maioria das estações, a principal origem de PAHs é pirogénica, ou seja, proveniente da queima de biomassa e de combustíveis fósseis. Contudo, o Per é formado maioritariamente por diagénese. Relativamente ao nível de contaminação em PAHs nas amostras de sedimento, avaliada segundo a Portaria n.º 1450/2002 de 12 de novembro, conclui-se que apenas algumas estações das áreas de Sagres/Tavira, estuário do Sado e das rias Formosa e de Aveiro, estão classificados como "classe 2 – contaminação vestigiaria". Para os restantes pontos o sedimento é considerado "material limpo".

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do Programa Operacional Mar 2020, Projeto AQUIMAR. (MAR-02-01-01-FEAMP-0107).

REFERÊNCIAS

European Commission (2002). Opinion of the Scientific Committee on Food on the risks to human health of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in food.

Instituto Hidrográfico (2021). NT.LB.58 - Determinação de Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos por GC-MSD - Amostras Sólidas.

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*, 669-703.

Netto, A., Moreira, J., Dias, A., Arbill, G., Ferreira, L., Oliveira, A., e Barek, J. (2000). Avaliação da contaminação humana por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e seus derivados nitrados (NHPAs): uma revisão metodológica. *Química Nova*, 23, 765-773.

Oliveira, M., Portella, C. D., Ramalhosa, M. J., Delerue-Matos, C., Sant'Ana, L. S., e Morais, S. (2020). Polycyclic aromatic hydrocarbons in wild and farmed whitemouth croaker and meagre from different Atlantic Ocean fishing areas: Concentrations and human health risk assessment. *Food and Chemical Toxicology, 146*.

Portaria n.º 1450/2007. D.R. I Série, 217 (07-11-12) 8372-8382.

Rocha, A.C. e Palma, C. (2019). Source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil sediments: application of different methods. *Science of the Total Environment*, 652, 1077-1089.

Serafim, A. Company, R. Lopes, B. Pereira, C., Cravo, A., Fonseca, V.F., França, S., Bebiano, M.J., Cabral, H.N. (2013). Evaluation of sediment toxixity in different Portuguese estuaries: ecological impact of methal and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Estuarine, Coastal ans Shelf Science*, 130, 30-41.

Stogiannidis, E., e Laane, R. (2015). Source Characterization of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Using Their Molecular Indices: An Overview of Possibilities. (D. M. Whitacre, Ed.) *Reviews of environmental contamination and toxicology,* 234, 49-133.

Tobiszewski, M. e Namieśnik, J. (2012). PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources. *Enviromental Pollution*, 162, 110-119.

Desenvolvimento e comparação de métodos de identificação da origem de derrames petrolíferos

A.C. Rocha (1), C. Palma (1), R. Bettencourt da Silva (2)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. catarina.rocha@hidrografico.pt

(2) Centro de Química Estrutural, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa Edifício C8, 1749-016 Lisboa, Portugal.

Resumo: As análises químicas a amostras recolhidas em ilícitos de poluição por produtos petrolíferos são um valioso auxílio na imputação de responsabilidades a nível judicial. Nestas análises são comparados índices de abundâncias entre componentes químicos (DR) obtidos por análise cromatográfica replicada das amostras. A sua comparação pode ser efetuada com critérios estimados pelo teste *t* de Student, que assume a normalidade das distribuições de probabilidade das DR, ou usando um critério único que considera a dispersão expectável do sistema. Porém, estas aproximações podem conduzir a comparações erradas impactando a qualidade das identificações. Este estudo pretende mostrar o efeito que diferentes condições do processamento de dados têm nos critérios de comparação de DR. O estudo recorre à simulação pelo Método de Monte Carlo, sustentada em dados de dispersão e correlação de sinais cromatográficos, que permite estimar critérios mais ajustados à realidade probabilística das variáveis comparando-os com os obtidos pelos métodos habituais.

Palavras-chave: análise estatística, cromatografia gasosa-espetrometria de massa, derrames, método de monte carlo, produtos petrolíferos.

1. INTRODUÇÃO

Os derrames de produtos petrolíferos acarretam elevados custos para a sociedade em termos económicos e ambientais sendo importante a imputação de responsabilidades. Os processos judiciais recorrem a análises químicas, executadas a amostras recolhidas na zona do derrame e nas fontes suspeitas da sua origem, que produzem evidências objetivas e fidedignas sobre a origem do incidente. Estas análises envolvem uma caracterização aprofundada da composição química das amostras, *vulgo* impressão digital, por Cromatografia Gasosa-Espetrometria de Massa (GC-MS). Aliada a esta, são usados métodos estatísticos que permitem inferir sobre o grau de semelhança das impressões digitais com elevado nível de objetividade, fundamentação e fiabilidade.

Índices entre abundâncias de compostos diferenciadores de ramas petrolíferas, *i.e.*, razões de diagnóstico (DR), são frequentemente usados na caracterização e diferenciação de produtos petrolíferos, assim como na avaliação da ocorrência de degradação que promove alterações composicionais das amostras. A origem de um derrame é facilmente identificada comparando as DR que caracterizam a impressão digital da amostra. Assim, a qualidade destas identificações pode ser avaliada pelo risco total (ou probabilidade) de verdadeira aceitação da equivalência composicional entre impressões digitais, definida como a probabilidade de se obter equivalência estatística entre todas as DR do conjunto, observadas em duas amostras. Nesta probabilidade reflete-se a adequação dos métodos de comparação de DR utilizados.

O método NORDTEST, implementado em 2002, recorre ao teste estatístico *t* de Student (S-t) para comparar DR (Faksness *et al.*, 2002). Este método sugere que pelo menos uma das amostras seja analisada em duplicado, a fim de produzir os limites de confiança usados para comparar DR observadas numa segunda amostra. A equivalência composicional entre amostras, positiva ou provável, é decidida se for verificada equivalência estatística em todas as DR do conjunto que caracteriza a impressão digital, para um nível de confiança de 95% e 98%, respetivamente. Neste método as DR são determinadas sob o formato *A/(A+B)* que evita a divisão por zero e a obtenção de valores substancialmente elevados ou baixos. Mais recentemente, foi reconhecido pelo Comité de Europeu de Normalização (CEN) o método CEN/Tr15522-2, atualizado e sujeito no último ano a publicação como referencial normativo (prEN 15522-2) (CEN, 2012; CEN, 2020). Este simplifica a metodologia NORDTEST sugerindo a análise em duplicado das amostras e a avaliação da diferença relativa entre DR segundo um critério único (SC) de 14%, baseado num desvio-padrão relativo (RSD) das DR de 5%. O formato de cálculo das DR a considerar deverá ser *A/B*, uma vez que para este formato o RSD revela ser independente do valor do rácio. A equivalência entre impressões digitais é decidida se todas as DR observadas nas duas amostras não diferirem além dos 14%.

Os métodos de comparação de DR normalizados, S-t e SC, consideram aproximações ou pressupostos que nem sempre são válidos, o que pode conduzir a avaliações erróneas sobre a equivalência de DR e,

consequentemente, sobre a equivalência entre impressões digitais. A estatística S-t assume que as distribuições de probabilidades das DR seguem uma distribuição normal. Porém, um estudo efetuado pelos autores demonstrou existir desvios à normalidade das distribuições de probabilidades de DR (Rocha *et al.*, 2022). Já o método de SC baseia-se no conhecimento empírico que os peritos foram adquirindo ao longo do tempo, assumindo a dispersão mais expectável do sistema. Esta aproximação pode favorecer ou prejudicar as identificações, uma vez que a dispersão é variável.

Para assegurar uma melhor qualidade das identificações justifica-se o desenvolvimento de abordagens de comparação de DR alicerçadas em métodos estatísticos mais aproximados da realidade das variáveis, como o desenvolvido por Rocha *et al.* (2022). Este método consiste em simulação numérica das DR pelo Método de Monte Carlo (MCM), sustentada em dados de dispersão e correlação entre sinais cromatográficos de GC-MS dos componentes que definem os rácios. Ao serem simuladas as distribuições de probabilidade, é possível determinar os percentis para o nível de confiança P que estabelecem os critérios de comparação de DR. Adicionalmente, a simulação pelo MCM possibilita estimar os riscos totais de verdadeira aceitação de equivalência composicional entre amostras e, assim, avaliar a qualidade das identificações.

O presente estudo visa avaliar e comparar a qualidade das identificações obtidas pelo MCM, que se ajusta à realidade probabilística das variáveis, e pelos métodos S-t e SC que recorrem a pressupostos e aproximações nem sempre válidos. O estudo foi executado sob diferentes condições de processamento de dados das metodologias comuns na área (Faksness *et al.*, 2002; CEN, 2012; CEN, 2020), possibilitando adquirir conhecimento sobre o seu impacto nos critérios de comparação de DR.

2. METODOLOGIA

2.1. Aquisição de dados experimentais

Neste estudo foi utilizado um extrato, designado MixCrudes, constituído pela mistura de extratos de crudes de diferentes origens geográficas (Rocha *et al.*, 2022). O extrato MixCrudes foi analisado em replicado por GC-MS, segundo as condições operacionais sugeridas na prEN 15522-2, adaptadas ao modo de injeção *on column*. Foram determinadas 22 DR pela quantificação de 31 compostos/grupos de compostos das classes alifáticos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, hopanos, esteranos e esteranos triaromáticos.

2.2. Comparação de razões de diagnóstico

A comparação de DR das amostras x e y, analisadas n_x e n_y vezes, é efetuada pelos métodos MCM, S-t e SC segundo as Eq. (1), (2) e (3), respetivamente.

$$P\left(\frac{(1-P)}{2}\right) \leq (\overline{DR}_{x;i} - \overline{DR}_{y;i}) \leq P\left(\frac{(1-(1-P))}{2}\right) \quad (1)$$

$$\left|\overline{DR}_{x;i} - \overline{DR}_{y;i}\right| \leq t((1-P);\xi) \cdot \sqrt{\frac{s_{x;i}^2}{n_x} + \frac{s_{y;i}^2}{n_y}} \quad (2)$$

$$\left|\overline{DR}_{x;i} - \overline{DR}_{y;i}\right| \leq 0{,}14 \cdot \overline{DR}_{x\&y;i} \quad (3)$$

onde $\overline{DR}_{x;i}$ e $\overline{DR}_{y;i}$ são os valores médios da razão i observada nas amostras x e y, respetivamente, $P\left(\frac{(1-P)}{2}\right)$ e $P\left(\frac{(1-(1-P))}{2}\right)$ são os percentis associados a P, $t((1-P);\xi)$ é o valor de t da distribuição S-t para uma probabilidade $(1-P)$ e ξ graus de liberdade (Rocha *et al.*, 2022) e $\overline{DR}_{x\&y;i}$ é o valor médio das médias da razão i observada nas amostras x e y.

2.3. Simulação de razões de diagnóstico e estimativa do risco total pelo Método de Monte Carlo

O MCM é um método estatístico computacional que, por meio de simulação, resolve problemas determinísticos ou estocásticos complexos. No presente estudo são simulados pelo MCM sinais cromatográficos correlacionados dos componentes que definem as DR com o objetivo de estimar os intervalos de confiança usados como critérios na comparação dos rácios. As DR estudadas foram simuladas em simultâneo para cada uma das amostras, x e y. O processo de simulação foi executado numa folha de cálculo desenvolvida em MS-Excel® e encontra-se detalhado em Rocha *et al.* (2022). Após simulação dos sinais cromatográficos para cada amostra estes são combinados no formato apropriado da DR (*A/(A+B)* ou *A/B*) seguindo-se da subtração de cada valor simulado de $\overline{DR}_{x;i}$ a cada valor simulado de $\overline{DR}_{y;i}$, *i.e.*, $(\overline{DR}_{x;i} - \overline{DR}_{y;i})$. Para cada DR são obtidas 11 séries de 10^4 resultados simulados de $(\overline{DR}_{x;i} - \overline{DR}_{y;i})$. As primeiras 10 séries são empregues para determinar os critérios de comparação de DR simuladas, representados pelos percentis associados a P = 95% e 98% (Eq. (1)), *i.e.*, *P*2,5 e *P*97,5, e *P*1 e *P*99, respetivamente. Para os métodos S-t e SC, os critérios são estimados a partir dos dados experimentais de acordo com a Eq. (2) e Eq. (3), respetivamente. A última série de 10^4 valores simulados é utilizada para (1) avaliar a equivalência estatística empregando os critérios definidos e (2) determinar a percentagem de conjuntos de DR para os quais é observada equivalência estatística em todas as DR (*i.e.*, os riscos totais de verdadeira aceitação da equivalência entre impressões digitais (δ)). Foram obtidos resultados considerando $n_x = 3, 5$ e 8, $n_y =$ 2 e 3, e dois formatos de cálculo de DR, designadamente *A/(A+B)* e *A/B*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 1 podem ser observados os intervalos de confiança definidos para $(\overline{DR}_{x;i} - \overline{DR}_{y;i})$, obtidos pelos métodos MCM, S-t e SC considerando as condições estudadas. Pela análise da figura 1, para o cenário que considera a análise em triplicado da

amostra y, é possível verificar que os intervalos de confiança obtidos pelo MCM são ligeiramente mais amplos que os obtidos pelo método S-t. Porém, não só a diferença observada entre estes tende a diminuir com o aumento de n_x, como também os intervalos definidos pelos dois métodos se tornam mais estreitos. Já os intervalos de confiança definidos pelo método SC, dependentes de $\overline{DR}_{x;i}$ e de $\overline{DR}_{y;i}$, apresentam amplitudes que variam menos de 1,7% com o aumento de n_x. Porém, estas amplitudes são expressivamente superiores às definidas pelos intervalos com $P = 98\%$ pelos métodos MCM e S-t para a generalidade das DR. Para o cenário em que se considera a análise em duplicado da amostra y, são observadas as mesmas tendências acima mencionadas para os intervalos de confiança definidos pelos métodos S-t e SC. No entanto, para MCM este cenário contraria as tendências notadas no cenário anterior, uma vez que os intervalos de confiança tendem a ser cada vez mais amplos com o aumento de n_x.

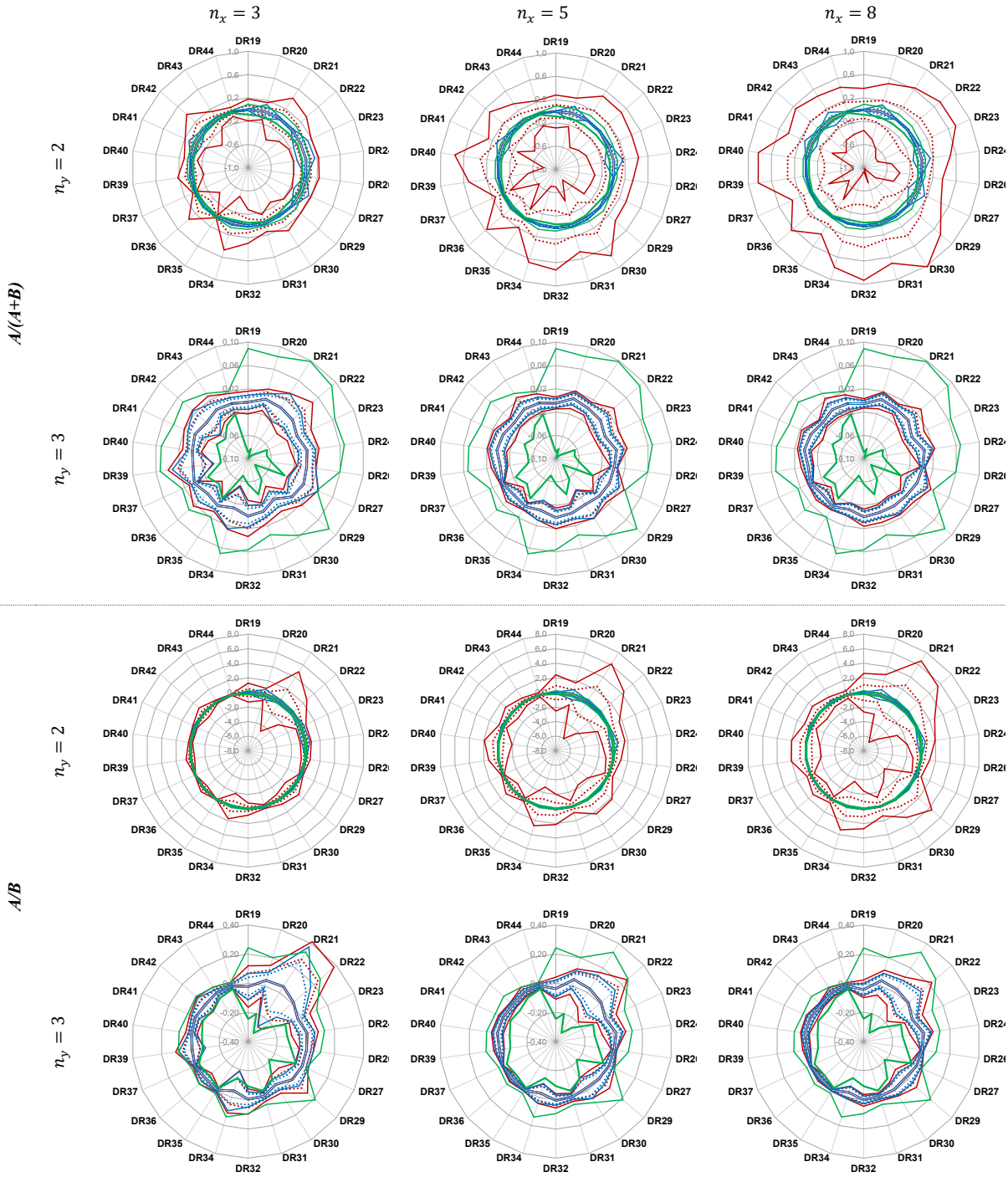


Fig. 1. Gráficos radar dos intervalos de confiança de $\left(\overline{DR}_{x;i} - \overline{DR}_{y;i}\right)$ das 22 DR determinadas nos formatos A/(A+B) e A/B, segundo os métodos ● MCM, ● S-t e ● SC, considerando $n_x = 3, 5$ e 8 e $n_y = 2$ e 3. = P50 (MCM e S-t) ou $\left(\overline{DR}_{x;i} - \overline{DR}_{y;i}\right)$; ····· P2,5 e P97,5 (MCM e S-t); ▬ P1 e P99 (MCM e S-t) ou SC_{LL} e SC_{UL}.

Esta propensão é explicada pelo formato mais achatado da distribuição de probabilidades de $(\overline{DR}_{x;i} - \overline{DR}_{y;i})$ comparativamente com a modelada pela S-t, o que leva a um afastamento dos percentis ao valor central da distribuição. No que diz respeito ao formato de cálculo das DR, os intervalos de confiança são, no geral, mais amplos quando o formato *A/B* é usado. Estas evidências impactam a qualidade das identificações. Na tabela I apresenta-se os δ estimados para os métodos MCM, S-t e SC considerando as várias condições estudadas.

Tabela. I. Riscos totais de verdadeira aceitação da equivalência composicional entre as amostras x e y (δ) estimados para os métodos MCM, S-t e SC considerando $n_x = 3,5$ e 8, $n_y = 2$ e 3 e os formatos de cálculo DR A/(A+B) e A/B.

			MCM		S-t		SC
	n_y	n_x	δ_{95}	δ_{98}	δ_{95}	δ_{98}	δ_{SC}
A/(A+B)	2	3	89,3	94,8	29,9	45,2	71,9
		5	88,3	92,8	2,3	5,9	52,8
		8	85,8	90,8	0,14	0,39	35,7
	3	3	83,1	93,4	64,6	80,3	95,7
		5	76,6	91,0	56,8	76,8	97,8
		8	74,7	90,4	51,4	72,5	98,3
A/B	2	3	89,1	94,5	30,3	45,1	53,0
		5	86,7	91,5	2,3	5,7	31,3
		8	84,1	89,7	0,070	0,43	18,0
	3	3	83,5	93,0	64,6	80,7	90,6
		5	75,7	90,7	56,0	75,7	95,7
		8	74,5	90,7	51,3	72,3	96,7

Pela análise da tabela I verifica-se que são alcançados δ mais altos pelo MCM comparativamente com os métodos S-t e SC, independentemente do formato de cálculo das DR, à exceção de δ estimados pelo método SC considerando análises em triplicado da amostra y. Também para os dois formatos de cálculo de DR, os δ estimados pelo método S-t são significativamente mais reduzidos que os estimados pelos métodos MCM e SC, especialmente quando análises em duplicado são consideradas para a amostra y. Tendencialmente, os δ estimados pelos métodos MCM e S-t aumentam com a diminuição de n_x, sendo já esperado uma vez que os intervalos de confiança são tanto mais amplos quanto menor for a robustez estatística conferida pelos graus de liberdade. No entanto, pelo MCM são estimados δ similares quando considerado análises em duplicado e em triplicado da amostra y, apesar da utilização de duplicados da amostra y produzir intervalos de confiança significativamente mais amplos. Assumindo que os limites de confiança para a comparação de DR são determinados de forma precisa para um nível de confiança *P* e, sendo as DR correlacionadas (coeficiente de correlação de *Pearson* inferior a 1), seria de se esperar que δ fosse inferior a *P* (*i.e.*, 95% e 98%) e superior a P^N, sendo *N* o número de DR que caracterizam a impressão digital (*i.e.*, 32,3% e 64,1%). Este facto é observável para δ estimados pelo MCM, independentemente das condições estudadas, e pelos métodos S-t e SC apenas quando análise em triplicado é considerada.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo visa demonstrar a aplicação de um método alternativo de comparação de DR recentemente desenvolvido, baseado em simulações pelo MCM, e a sua comparação com os métodos habitualmente empregues na área, *i.e.*, S-t e SC. Na definição dos critérios para a comparação de DR por cada método foram usadas diversas condições de processamento de dados, o que permitiu avaliar o impacto destas nos limites produzidos.

Os intervalos definidos pelos critérios de comparação de DR mostraram ser impactados pelo número de análises em replicado das amostras a comparar, revelando ser mais amplos com a diminuição da robustez estatística conferida pelos graus de liberdade e para o formato de cálculo *A/B*.

A qualidade das identificações foi também avaliada pela estimativa de δ que se relaciona com os intervalos de confiança gerados pelos diferentes métodos de comparação de DR. O método alternativo desenvolvido, MCM, que se adapta à realidade estatística da variável DR, demonstrou ser mais criterioso e ajustado à comparação dos rácios, produzindo identificações com melhor qualidade e aplicando menores recursos, como o número de análises e o tempo de aquisição e processamento de dados cromatográficos dele consequente.

Agradecimentos

R.J.N Bettencourt da Silva foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), através dos projetos UIDB/00100/2020 e UIDP/00100/2020.

REFERÊNCIAS

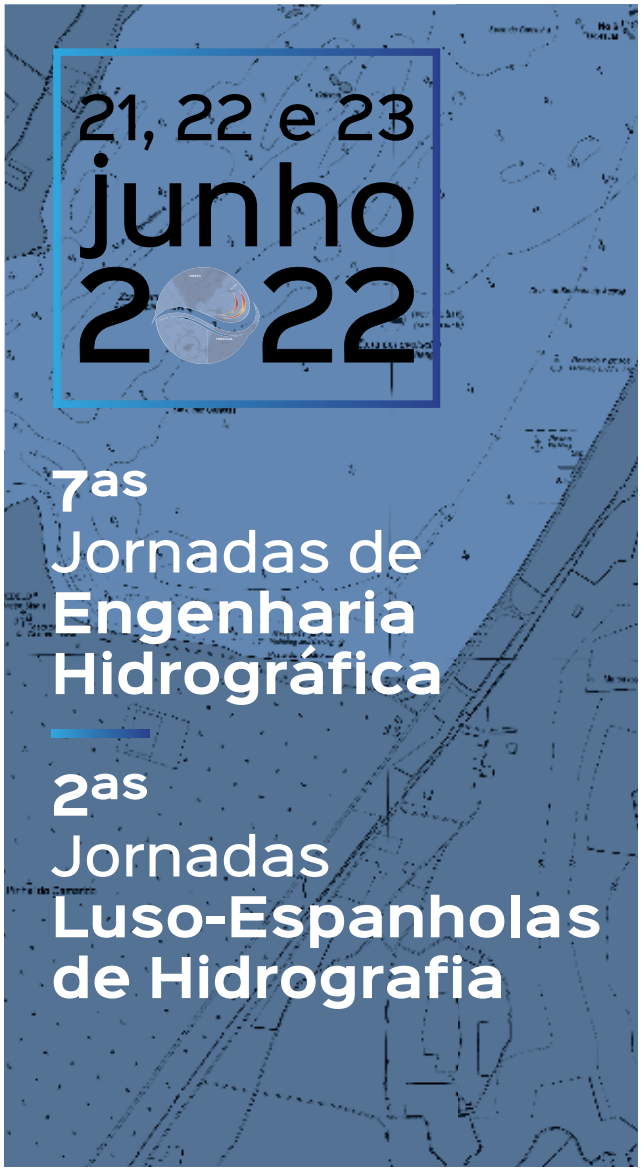
CEN. (2012). Oil spill identification – Waterborne petroleum and petroleum products – part 2: Analytical methodology and interpretation of results based on GC-FID and GC-MS low resolution analyses. Brussels Studies Institute. Brussels:Belgium. 138 p. (CEN/Tr15522-2:2012)

CEN. (2020). Oil spill identification – Waterborne petroleum and petroleum products – part 2: Analytical methodology and interpretation of results based on GC-FID and GC-MS low resolution analyses. Brussels Studies Institute. Brussels:Belgium. 194 p. (prEN15522-2:2020)

Faksness, L.-G.; Weiss, H.; Daling, P. S. (2002). Revision of the Nordtest methodology for oil spill identification. SINTEF. Trondheim:Norway. 110 p. (SINTEF report STF66 A01028)

Rocha, A.C.; Palma, C.; Bettencourt da Silva, R.J.N. (2022). Development and validation of statistically sound criteria for the match of unweathered GC-MS fingerprints in oil spill forensics. *Chemosphere*, 289, 133085.

TECNOLOGIAS DO MAR



Uncrewed surface vehicles network initiative in support to EOOS

C. Barrera (1), J. Tasso-Sousa (2), C. Waldmann (3), J. Burris (4), A. Cianca (1)

(1) Oceanic Platform of the Canary Islands, Spain. carlos.barrera@plocan.eu.

(2) University of Porto, Portugal.

(3) MARUM-University of Bremen, Germany.

(4) National Oceanography Centre, United Kingdom.

Abstract: The European Ocean Observing System (EOOS) is a coordinating framework designed to align and integrate Europe's ocean-observing capacity, promote a systematic and collaborative approach to collecting information on the state and variability of our seas, and underpin sustainable management of the marine environment and its resources. Within the framework of EOOS is EuroSea, an EU-project with the overall goal to consolidate a more integrated interdisciplinary ocean observing system able to deliver essential information for the wellbeing, blue growth and sustainable management of the ocean, based on the implementation and coordination of the different observing networks above-mentioned, being the Uncrewed Surface Vehicles (USV) technology one main novelty as network initiative aiming to engage existing and forthcoming actors from public and private sector, to set and coordinate efforts to establish a recognized international network under common best practices and standard procedures.

Key words: autonomy, EOOS, marine robotics, ocean observing, network.

1. INTRODUCTION

Autonomy and unmanned systems have significantly evolved in the last decades becoming a key routine-component for several sectors and domains as intrinsic sign of their improvement, not being the ocean an exception. The Ocean Observing System includes different networks, integrating their data output in data assimilation centers that feeds into the assimilation and forecast systems (Martín-Míguez et al. 2019). A wide range of platforms and systems constitute the current global ocean observing infrastructure, including satellite observations, research vessels, autonomous floats, underwater gliders, fixed-point observatories, sea level stations, high frequency radar and autonomous surface vehicles (Larkin et al., 2019). Currently the ocean observing system remain largely immature and is composed of a large and diverse set of actors, such as research institutes, governmental agencies and the private sector (She et al., 2016).

2. THE EOOS FRAMEWORK

The European Ocean Observing System (EOOS) is a coordinating framework designed to align and integrate Europe's ocean-observing capacity, promote a systematic and collaborative approach to collecting information on the state and variability of our seas, and underpin sustainable management of the marine environment and its resources. An overarching strategy across all measurement platforms is required to ensure that best use is made of limited resources in Member States and at European level (EuroGOOS 2018). EOOS attempts to link the currently disparate components of the observing system in Europe and promote novel technology and infrastructure development, standardization, open access to data, and capacity building (Tanhua et al., 2019).



Fig. 1. Conceptual approach of the Global Ocean Observing System based on existing monitoring technologies.

Within the framework of EOOS is the EU-funded EuroSea project, with an overall goal about to consolidate a more integrated interdisciplinary ocean observing system able to deliver essential information for the wellbeing, blue growth and sustainable management of the ocean, based on the implementation and coordination of the different observing networks above-mentioned.

The USV technology one of the main novelties in terms of network initiative that attempts to engage existing and forthcoming actors from public and private sectors, to set and coordinate current and upcoming efforts in order to establish and consolidate a recognized international network under common

Best Practices and Standard Procedures in support to EOOS strategy.

3. USV TECHNOLOGY OVERVIEW

Transition from research concept to commercial product and related services has not always been easy in most cases due to technology, business and policy framework constrains. Unmanned Surface Vehicles (USV) is one of the right domains to illustrate this evolution (Liu et al., 2016), (Manley, 2008). Starting as small custom-prototypes operating near shore for survey and research applications to evolve a more complex and capable platforms able to operate also in highly demanding specific-scenarios or open-ocean areas for long periods in routine-fully-autonomous mode as single unit or fleet configuration (Bibuli et al. 2012), (Johnston and Poole, 2017), (Zhang et al., 2019). This has enabled to pave the way to release a first approach on small and large-scale autonomous ships implementation as ultimate step in maritime autonomy (Wright, 2020), (Kim et al., 2020), (IMO, 2018).

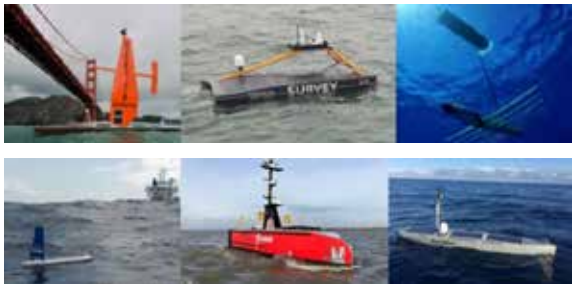


Fig. 2. USV technologies currently available for ocean-observing.

Technology developments enabling USV include a multidisciplinary set of cutting-edge sensors and systems for guidance, navigation, control, telemetry, propulsion, path planning, as well as specific tools for oversight operations and situational awareness, being key the inclusion of machine/deep learning and artificial intelligence techniques. USV capabilities and applications include nowadays a wide range of operations and services addressed to cover specific needs from marine and maritime sectors. The policy and regulatory environment of USV is being developed at high and global level by IMO for MASS implementation.

4. FROM USV TO MASS

We are nowadays facing a step further towards a new paradigm associated with cyber-physical systems, big data and autonomy as part of Shipping 4.0 and Digital Ocean international trends and strategies. Efforts in transport cost reduction, the global need of minimize emissions and the demand for improving safety at sea are three base reasons on why autonomous shipping is under consideration and early stages of implementation. The development and future implementation of vessels as MASS (Maritime Autonomous Surface Ship) will represent an inflexion point for the paradigm shift in the industry and maritime shipping system as a whole. Industries related to high specialized technology base sectors such autonomy and automation, unmanned operations, big data, artificial intelligence, machine learning, enterprise-grade connectivity and analytics will be essential. Although some regulatory aspects of manned vessels may be compatible with unmanned vessels, such as certain clauses of the International Safety Management (ISM) Code, there is a need for specific international regulations considering the characteristics of unmanned vessels as well. As ultimate regulator responsible for the COLREGs, the International Maritime Organization (IMO) in 2017 agreed to include marine autonomous surface ships (MASS) in agenda and started with a scoping exercise to determine how the safe, secure and environmentally sound operation of MASS might be introduced in IMO policies and rules.

Level	Description
1	Ship with automated processes and decision support
2	Remotely controlled ships with seafarers onboard
3	Remotely controlled ships without seafarers onboard
4	Fully autonomous ships

Tab. i. MASS Levels of Control according to IMO's regulatory scoping exercise from 2018.

Acknowledgements

The authors wants to acknowledge the EuroSea project coordination board as well as the EuroGOOS Secretariat for their support to this initiative. Special mention also to all the companies, institutions and stakeholders already engaged and committed in order to make the USV network real and useful for the EOOS community in benefit to society worldwide.

REFERENCES

Bibuli, M., Caccia, M., Lapierre, L., & Bruzzone, G. (2012). Guidance of unmanned surface vehicles: Experiments in vehicle following. IEEE Robotics & Automation Magazine, 19(3), 92-102.

EOOS Implementation Plan 2018-2022 (2018). EuroGOOS, Brussels. 22pp.

IMO (2018). Regulatory scoping exercise for the use of maritime autonomous surface ships (MASS). MSC 99/5/12.

Johnston, P. and Poole, M. (2017). Marine surveillance capabilities of the AutoNaut wave-propelled unmanned surface vessel (USV). OCEANS 2017 - Aberdeen, Aberdeen, UK. pp.1-46, doi: 10.1109/ OCEANSE.2017.8084782.

Kim, M., Joung, T-H., Jeong, B. and Park, H-S. (2020). Autonomous shipping and its impact on regulations, technologies and industries. Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs and Shipping. 4 (2):17-25.

Larkin, K., Marsan, A.-A., Tonné, N. and Calewaert, J.-B. (eds) (2019). EOOS Conference 2018 Report and Call to Action. Connecting European Ocean Observing Communities for End-to-End Solutions. Brussels: The Egg, 21–23.

Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X. and Yuan, C. (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. Annual Reviews and Control, 41:71-93, doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.018.

Manley, JE. (2008). Unmanned surface vehicles, 15 years of development. Proceedings of IEEE International Conference on OCEANS (pp. 1-4).

Martín-Míguez B. et al. (2019). The European Marine Observation and Data Network (EMODnet): Visions and Roles of the Gateway to Marine Data in Europe. Front. Mar. Sci. 6:313. doi: 10.3389/fmars.2019.00313.

She, J., Eparkhina D. and Nolan G. (Eds.). (2016). European operational oceanography: Delivering services for Blue Growth and ecosystem-based management. EuroGOOS Policy Brief. EuroGOOS. Brussels, Belgium. 2016. ISBN 978-2-9601883-0-1. 14pp.

Tanhua T. et al. (2019). What We Have Learned from the Framework for Ocean Observing: Evolution of the Global Ocean Observing System. Front. Mar. Sci., 6:471, doi.10.3389/fmars.2019.00471.

Wright, R.G. (2020). Unmanned and Autonomous Ships: An Overview of MASS (1st ed.). Routledge. NY. pp. 288. https://doi.org /10.1201/9780429450655.

Zhang, D., Cronin, M., Meinig, C., Farrar, J., Jenkins, R., Peacock, D., Keene, J., Sutton, A., and Yang, Q. (2019). Comparing Air-Sea Flux Measurements from a New Unmanned Surface Vehicle and Proven Platforms during the SPURS-2 Field Campaign. Oceanography. 32:122-133. doi:10.5670/oceanog.2019.220.

Construção e teste de um sistema para trabalhos de acústica submarina em tanque anecóico

M. Barreto (1), M. Gatta (1,2,3), V. Lobo (1,2,4)

(1) Escola Naval, miguelbarreto00@gmail.com

(2) CINAV, Centro de Investigação Naval.

(3) CFCUL, Universidade de Lisboa.

(4) NOVA IMS.

Resumo: O Arsenal do Alfeite dispõe de um tanque anecóico, usado para a calibração de sonares de navios militares. Neste artigo descrevemos um sistema desenvolvido para ali se realizarem também testes para a caracterização acústica de pequenos objetos sujeitos a servir como alvos de sondagem. Desenvolveu-se um sistema sonar bi-estático usando equipamentos já disponíveis na instalação mas também associando aos sistemas de emissão e recepção, tecnologias digitais como um gerador de sinais, osciloscópio e computador. Construiu-se uma estrutura para suspensão dos transdutores e alvo adaptada às dimensões deste tanque e à ponte móvel que o equipa. É um sistema versátil, possibilitando qualquer geometria experimental que se pretenda implementar em condições de campo-livre até 5 m de diâmetro. O software de processamento de dados e análise de resultados foi desenvolvido em MATLAB. O sistema criado serve o ensino da acústica submarina, bem como a investigação e inovação tecnológica nos seus vários domínios.

Palavras-chave: acústica submarina, caracterização acústica, matlab, *target strength*, SONAR.

1. INTRODUÇÃO

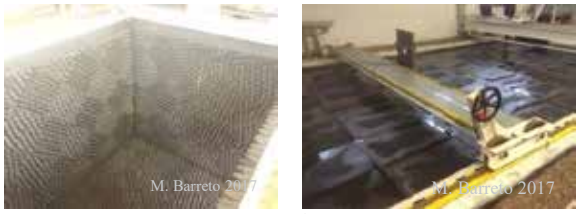
Havia que realizar um estudo para se caracterizar a resposta acústica de pequenos objectos à sondagem por golfinhos (ecolocalização), que - no que será um processo análogo ao exercício da hidrografia, possam ser alvos de busca sonar. Precisava-se por isso de reunir informação relevante para daí se fundamentar a discussão de hipóteses relativas à sua eventual detectabilidade – nomeadamente os valores de *Target Strength* (TS) a várias frequências. Tal, motivou à construção de um sistema sonar que fosse eficaz para a transmissão e recepção de sinais no espectro frequencial explorado por estes animais, cujos cliques de banda larga contêm energia até aos quase 200 KHz. Solicitou-se ao Arsenal do Alfeite, S.A (AA), a permissão para uso do tanque para ensaios de acústica submarina, que por ser uma infra-estrutura concebida para a calibração em ambiente submerso de sistemas de sonar navais, está revestida de protecção anecoica para a supressão de ecos e manutenção de baixos níveis de ruído. Mas também, por possuír e permitir instalar equipamentos como transdutores e demais sistemas essenciais às cadeias de transmissão (TX) e recepção (RX) de sinais sonoros, providenciaria as condições óptimas para a realização dos referidos testes. Afim de se concretizar a geometria experimental desejada, houve que construír uma estrutura para suporte de sensores e alvo adaptada às condições do tanque e ponte móvel que o equipa, e permitisse também o fácil manuseio e regulação individual dos vários componentes. Conjugaram-se então, meios electro-acústicos dísponibilizados pelo AA para as cadeias do TX e RX, meios electrónicos da Escola Naval (EA) para a produção e aquisição de sinais, a par ainda de computador com software dedicado para a sua importação e armazenamento e construidas uma sequência de rotinas MATLAB para processamento dos dados. O conhecimento e a exploração dos oceanos são hoje prioridades da humanidade, tendo aliás a UNESCO designado o período 2021-2030 como a Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável, e em linha com este objectivo surge também o projecto de cooperação internacional SEABED2030 para que ainda neste prazo, se concretize o mapeamento total dos fundos submarinos do planeta. A acústica submarina (AS) que é uma ferramenta fulcral para as ciências e operações em meio oceânico, seja para a hidrografia, para a Defesa, para a monitorização e conservação ambiental marinha, como para o desenvolvimento das economias e indústrias do mar, terá assim vasta aplicação nos esforços a empreender para se cumprir o acima estipulado. Os recursos que se conjugaram para a construção de um sonar que se projectou para a finalidade específica de se observarem processos de formação do eco de alvos, podem ser adaptados e servir muitos outros objectivos experimentais no âmbito da AS. Desta forma entendemos ser oportuno proceder à divulgação do sistema concebido e dos meios que se reuniram para a execução do trabalho, acreditando dessa forma estar a contribuír com um recurso para o ensino da AS, fomentar a realização de projectos de investigação nesta área cíentifica e a inovação tecnológica para os oceanos.

2. RECURSOS, MEIOS TECNOLÓGICOS E CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

Este sistema sonar, que se concebeu no propósito de estudar em condições laboratoriais, a reflectividade acústica de pequenos objectos sujeitos a servir como alvos de busca submarina, não se destina a equipar embarcações ou servir fins operacionais. Trata-se de uma instalação de laboratório que se edificou com os meios que se descrevem em baixo, obedece a uma configuração do tipo bi-estática e perfaz uma geometria experimental triângular sendo os vários equipamentos e alvo dispostos igualmente entre si, à distância de referência padronizada (1m da fonte), e constituí-se também da programação informática para execução em fase posterior, do processamento de dados e análise dos resultados.

1.1. Tanque para ensaios de acústica submarina

Esta infra-estrutura, de geometria rectangular (8x5x5 m), é revestida nas paredes, fundo e superfície com placas em material compósito de corticite (um composto de borracha e cortiça) que promove o isolamento e absorção da energia acústica e ainda protuberâncias triângulares projectadas para dispersar quaisquer reflecções (Figura. 1.a), proporcionando assim níveis reduzidos de ruído e baixo tempo de vida de ecos persistentes que afectem negativamente as medições. Está também equipada com duas pontes móveis que permitem o suporte de equipamentos (Figura. 1.b) e a colocação dos meios a submergir, em qualquer local e profundidades deste espaço sem restrições. A saber também porque determina a velocidade do som, refira-se que nesta infra-estrutura é usada apenas água doce da rede pública.



a b

Figura. 1. a) Vista do tanque "a seco"; b) Pormenor da ponte móvel e placas anecoicas à superfície.

1.2. Configuração instrumental

A configuração instrumental concebida para as sessões laboratoriais, obedece ao seguinte esquema (Figura. 2), subdivindo-se assim nos circuitos: de "*geração e transmissão de sinais*" (circuito TX); de "*recepção de sinais e eco*" (circuito RX) e no "*módulo de visualização, captação e armazenamento de dados*". Atente-se à derivação na ligação da recepção ao osciloscópio, cuja informação é enviada em paralelo para os dois canais deste.

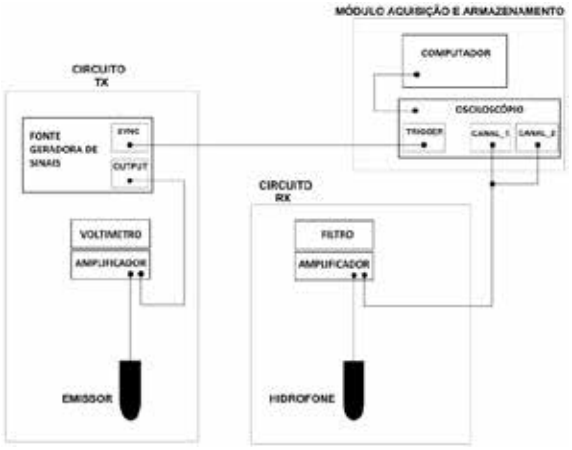


Figura. 2. Esquema da configuração instrumental.

1.3. Geração e Transmissão de sinais

O circuito de transmissão (TX) compõe-se por: fonte geradora de sinais digital "AGILENT-33220A" (Figura.3.a), do fabricante Bruel & Kjaer (B&K) os amplificador+voltimetro para ajuste dos valores do ganho de saída (dBv) e Vpico (Figura.3.b), e o transdutor omni-direccional 8104 que como emissor projecta o sinal radialmente (Figura.3.c).

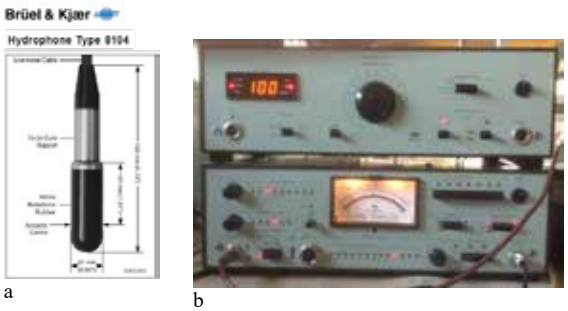


a b c

Figura.3. a) fonte geradora; b) amplificador+voltimetro e c) o transdutor.

1.4. Recepção de sinais e ecos

O circuito da recepção (RX) compõe-se igualmente de sistemas B&K. Tendo como hidrofone, um segundo 8104 (Figura.4.a) omni-direccional, que envia os sinais recebidos para o conjunto amplificador+filtro analógicos (Figura.4.b).



a b

Figura.4. a) Hidrofone 8014; b) conjunto amplificador+filtro.

1.5. Visualização, captação e armazenamento

Para visualização de ambos os sinais "incidente" e eco "reflectido" que assim permite a monitorização e controle da experiência em tempo real, como ainda o ajuste de parâmetros e também a aquisição dos

O autor deste artigo não adopta o novo acordo ortográfico.

dados, fez-se uso do osciloscópio de dois canais/10Bits TEKTRONICS TDS 1002B que amostra a uma taxa de 10^6 amostras*s^{-1}, sendo o *trigger* deste ligado ao da fonte geradora que por este modo o controla (Figura.5.a). Pelo software OPENCHOICE DESKTOP num computador com ligação USB ao osciloscópio, o operador solicita a importação de um ciclo de dados (Figura.5.b, c) e que os pode depois armazenar como um ficheiro .CSV ou de imagem.



a b c

Figura.5. a) Osciloscópio digital para monitorização e aquisição de dados, sendo visivel a derivação do RX aos dois canais e a ligação do trigger à fonte geradora; b) visualização dos dados transferidos para o software no laptop; e c) pormenor da visualização no software, dos 2 canais: com escala Volt/divisão regulada para o sinal emitido (azul) e para o eco reflectido (amarelo).

1.6. Estrutura para suporte dos transdutores e alvo Processsamento de dados e análise de resultados

Construiu-se uma estrutura para a suspensão dos transdutores (TX e RX) e alvo, adaptada às dimensões do tanque anecóico do AA e à ponte móvel que o equipa (Figura.6). Com dois braços independentes entre si, cada um com 2,5 m de comprido e capacidade de giro 360º em torno do eixo central, permite a suspensão de pequenas cargas (transdutores ou alvos, <1kg) a diferentes profundidades e em pontos distintos do espaço experimental. O eixo central que é materializado por uma coluna oca, favorece ainda o seu uso para suporte e rotação de equipamentos de maior peso (ex: um emissor direccional), possibilitando ao operador o fácil ajuste da orientação azimutal em qualquer instante durante a realização dos trabalhos.

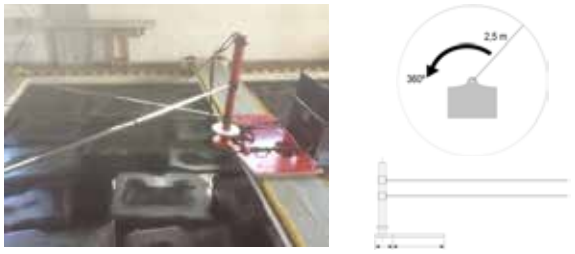


Figura.6. Imagem e esquema técnico da estrutura para suporte de equipamentos acústicos e do alvo.

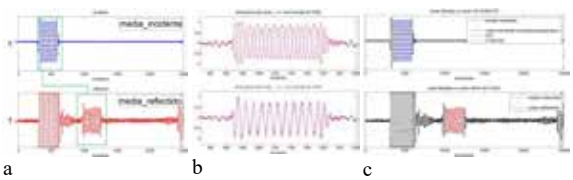
Para suspender os alvos usou-se linha de nylon que por ter espessura muito fina e ainda que seja susceptível de esticar, será acústicamente transparente às frequências usadas. Ambos os braços têm cravadas marcas visíveis, espaçadas a intervalos de 5 cm´s e sendo o ponto de suspensão das cargas conseguido com tiras de velcro que permitem o fácil ajuste da distância desejada, deslizando-a ao longo do braço no que é um método também vantajoso que por não se constituir de peças duras, não provoca ruídos ou vibrações que afectem as medições. Duas meias luas em madeira que se aparafusam uma à outra em torno da coluna central, servem para colocar um diagrama azimutal onde se lê a abertura ângular dos braços. Uma placa de madeira pesada na base, reforça a estabilidade da estrutura e elimina a transmissão de vibrações mecânicas propagadas pela ponte móvel.

1.7. Processsamento de dados e análise de resultados

Para aceder aos dados armazenados e cálcular os resultados que se pretendía conhecer, programou-se uma sequência de rotinas a executar em ambiente MATLAB. Tinha-se como objectivo avaliar o parâmetro do *Target Strength* (TS), valor que se deriva pela razão matemática (Equação 1) que compara a energia Reflectida (E_r) com a Incidente (E_i) e se lê na unidade de medida, o décibel (dB_E), sendo que aqui o fazemos no domínio da frequência para tempos de integração que se pretendem iguais e seleccionando apenas a porção estável destes sinais que está contida entre os picos (transitórios) nos seus extremos e que são consequência da excitação e corte súbitos da tensão eléctrica aos terminais do transdutor (Figura.7.c).

$$TS = 10 * \log_{10}\left(\frac{E_r}{E_i}\right) \qquad 1$$

Contudo, do processo de aquisição usado ocorrem lacunas nos dados (*i. e.,* presença de Nan´s) que geram erros de leitura e inviabilizavam o uso das funções internas do MATLAB. Tal obrigou a que, para contornar este problema se construíssem de raíz muitas das funções necessárias. Uma vez importados para o *workspace* os ficheiros de dados brutos dos *n* testes que por razões estatísticas se haviam realizado repetidamente, são construídos os vectores-coluna do "Incidente médio" e "Reflectido médio" (Figura.7.a). Como alternativa à função para a correlação de sinais, uma figura com duas imagens (Figura.7.b) sobrepõe réplicas normalizadas de ambos (em cima como originais e em baixo o "Incidente" multiplicado por -1) para que o operador num processo iterativo, ora aceite ou apresente nova amostra de sincronismo e avalie se o alvo reflecte o eco com inversão de fase.



a b c

Figura.7. Visualização dos dados no MATLAB. a) aquisição nos canais, "Incidente" a azul e "Reflectido" a vermelho; b) sobreposição de cópias normalizadas dos dois sinais: em fase

(cima) ou o simétrico do Incidente com o Refletido (baixo), para identificar alvos que reflectem com inversão de fase. c) intervalos seleccionados para análise do Incidente (azul) e eco reflectido (vermelho).

Para converter ambos "Incidente" e "Reflectido" ao domínio da frequência e pela razão dos NAN´s (Figura. 8) inviabilizarem o uso da FFT do MATLAB, construíu-se uma rotina que executa a Transformada Discreta de Fourier (DFT) e serve também como processo para a interpolação do conteúdo em falta. Ao processo de filtragem, que sucede do desenvolvido em anteriores trabalhos de Cadetes da EN (Imperadeiro, 2010), segue-se o cálculo dos valores de energia (E) dos "Reflectido" e "Incidente" para que se estimem então os valores TS. Por fim acede à totalidade dos resultados TS de cada alvo e grafica a curva que lhe corresponde da resposta em frequência.

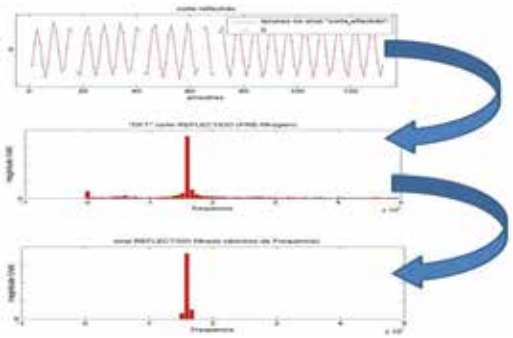


Figura. 8. O processo de filtragem dos sinais. Em cima, excerto de amostras no domínio do tempo seleccionadas para análise - e onde se pode observar a ocorrência de lacuna (NaN´s). Ao centro, após conversão pela DFT, o histograma da distribuição de energia por bandas de frequência. Em baixo, o histrograma após filtragem, constando a banda central (a frequência de teste) e duas bandas vizinhas - pelo fenómeno do "leakadge".

3. DISCUSSÃO

Foi por o TX emitir num padrão radial e o RX ser omni-direccional, que se concebeu este sonar com os transdutores e alvos posicionados igualmente entre si perfazendo uma geometria triângular, isto é, numa configuração bi-estática (apesar de diferir da desejável, mono-estática como nos golfinhos). Assim resulta que ao RX chegam: réplica fiél do sinal "Incidente" quando atinge o alvo, e após um ligeiro atraso de tempo e mais atenuado, também o eco "Reflectido". Daí entendeu-se derivar o sinal eléctrico do RX para os dois canais do osciloscópio e se adequassem as escalas Volt/divisão para os visualizar em simultâneo. Tem como vantagem, que permite monitorizar um sinal equivalente ao "Incidente" no ponto específico de contacto com o alvo e permitindo assim dispensar: amostragem do sinal eléctrico do TX ou a calibração prévia da experiência com medições *in situ* do "Incidente". Quanto à recolha de dados com osciloscópio, tem como desvantagem: *a)* impôr à importação de dados, um processo de comando manual (ciclo a ciclo) que é lento e condicionou a quantidade de testes obtidos (3) abaixo dos critérios estatísticos (30); e *b)* a amostragem que é afectada pela ocorrência de lacunas que geram erros, obrigou à construção, de raíz, das rotinas e funções necessárias ao processamento dos dados recolhidos. Contudo, tem como solução se em alternativa se usar uma placa AD que permita a aquisição automatizada de diversos testes em série e sem lacunas, devendo-se garantir as taxas de amostragem adequadas à frequência máxima dos sinais. Com esta estrutura, os Cadetes e investigadores da EN têm agora à disposição um recurso cujas características e versatilidade lhes permite, em conjugação com a mobilidade das pontes móveis do tanque, implementar qualquer geometria experimental para estudos de reflectividade acústica e de detecção de alvos submersos, em condições de campo-livre, num espaço circunscrito a uma circunferência com até 5 m de diâmetro. Podem ainda adaptar-se estes meios para a realização de trabalhos nos vários domínios da AS, seja para o ensino, para a investigação científica ou a experimentação e inovação tecnológica. Sugerem-se como tópicos para trabalhar na práctica: a medição do ruído submarino, sistemas para o mapeamento e caracterização de superfícies submersas, a detecção, localização e classificação de alvos ou de fontes sonoras e a concepção de redes acústicas para as comunicações e posicionamento geodésico submarino (ler Van Uffelen, 2021), apelando-se em especial às temáticas associadas aos processos de formação de eco acústico dos objectos, aos metamateriais e *cloaks* para a ocultação de alvos, ora na coluna de água, como no leito marinho e que são exemplo os *Ground cloaks* (ler Bi et al., 2018).

Agradecimentos

Temos a agradecer ao CINAV e à Escola Naval, nomeadamente ao Dept. das Engenharias, como às oficinas e respectivo pessoal dos serviços de serralharia e carpintaria, em concreto o Srº Aires, Sarg. MQ Heitor e mestre Vinagre pela dedicação ao fabrico da estrutura; ao Arsenal do Alfeite, S.A., nomeadamente aos Srº Eng. Parreira, mestre Pedro e restante equipa técnica do tanque de acústica submarina. Este projecto beneficiou ainda do suporte financeiro dos projectos DEEPFLOAT e SIDENAV.

REFERÊNCIAS

Bi, Y., Jia, H., Sun, Z., Yang, Y., Zhao, H., & Yang, J. (2018). Experimental demonstration of three-dimensional broadband underwater acoustic carpet cloak. APPLIED PHYSICS LETTERS 112, 223502.

Imperadeiro, C. M. P. (2010). Sistema de Sensores para o Tanque de Acústica Submarina da Escola Naval. Dissertação de Mestrado. *Escola Naval*.

Van Uffelen, L. J. (2021). Global Positioning Systems: Over Land and Under Sea. *Acoustics Today*. Acoustical Society of America.

O autor deste artigo não adopta o novo acordo ortográfico.

Ensaios em Modelo Físico para Análise do Surf na Praia da Vagueira

A. Mendonça (1), C. Fortes (1), F. Duarte (2), R. Reis (1), C. Costa (1), C. Caeiro (2)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil 101, 1700-066, Lisboa, Portugal.

(2) Escola Profissional de Ciências Geográficas, Edifício 1, R. Artilharia 1 107, Piso 1,1099-052 Lisboa, Portugal

Resumo: No LNEC foram realizados ensaios em modelo físico 3D, para analisar as condições hidrodinâmicas em torno de um quebra-mar destacado (QMD) submerso, para um nível de maré médio no âmbito do Estudo de caraterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira (realizado para a Agência Portuguesa do Ambiente). Um dos objetivos deste QMD era potenciar a criação de ondas de referência para o surf, e consequente reforço da economia associada a esta atividade. Para esta vertente do surf, neste artigo, descrevem-se os ensaios complementares de hidrodinâmica considerando níveis de maré de preia-mar e de baixa-mar e analisa-se a influência de diferentes condições de agitação e níveis de maré nas condições de rebentação da onda e nos parâmetros de surfabilidade (amplificação de onda, comprimento da linha de rebentação e tipo de rebentação). O QMD contribuiu, para certas condições, que a rebentação seja do tipo mergulhante e ocorra de forma gradual sendo adequada para a prática de surf.

Palavras-chave: ensaios 3D, quebra-mar destacado, surf, vagueira.

1. INTRODUÇÃO

Para determinadas condições de agitação marítima e nível de maré, são frequentes os eventos de galgamentos costeiros no aglomerado urbano e a ocorrência de problemas de erosão em certas zonas da praia da Vagueira.

Para contrariar esta situação, foram efetuados no LNEC (a pedido da Agência Portuguesa do Ambiente, APA) um conjunto amplo de estudos em modelo numérico e físico para caraterizar e analisar a viabilidade de um quebra-mar destacado (QMD) multifuncional em frente à Praia da Vagueira.

Os objetivos estabelecidos para esse QMD multifuncional foram que contribuísse para reduzir o risco de galgamentos costeiros no aglomerado urbano da Praia da Vagueira, promover o acréscimo do areal da praia emersa em frente à defesa aderente, reforçando a defesa natural contra a erosão e inundação costeira, e potenciar a criação de ondas de referência para o surf, e consequente reforço da economia associada a esta atividade.

Na vertente do surf e dos estudos de modelação física, foram efetuados um conjunto de ensaios em modelo físico 3D para analisar as condições hidrodinâmicas em torno de um quebra-mar destacado (QMD) submerso, Sancho et al. (2021) e Mendonça et al. (2022). Testaram-se condições de agitação regular e irregular, com períodos de 10 s e 12 s, e alturas de onda de 1.5 a 2.0 m, para o nível de maré correspondente ao nível médio, NMM=+2.17 m (ZH).

No seguimento daqueles trabalhos que, entretanto, finalizou, foram efetuados ensaios complementares considerando níveis de maré de preia-mar e de baixa-mar.

No presente trabalho descrevem-se os ensaios de hidrodinâmica realizados para estes 2 níveis de maré e analisa-se a influência de diferentes condições de agitação e níveis de maré nas condições de rebentação da onda e nos parâmetros de surfabilidade (amplificação de onda, comprimento da linha de rebentação e tipo de rebentação).

2. MÉTODOS

2.1. Caso de estudo - Vagueira

A zona de estudo é a área costeira da Praia da Vagueira que inclui uma defesa frontal aderente de enrocamento, com cerca de 620 m de comprimento e cuja construção se iniciou em 1978, e um esporão, Figura 1.



Figura 1. Imagem de satélite da praia da Vagueira

Como referido, pretende-se potenciar o surf na zona da praia da Vagueira, entre outros objetivos, pelo que os estudos em modelo numérico e físico conduziram

a uma proposta de QMD, com 300 m de comprimento, coroamento à cota +0.34 m (ZH) e a uma distância da linha de costa de 400 m, Sancho et al. (2019) e Oliveira et al (2020). A cota de implantação varia entre -3 e os -7 m (ZH). A largura do coroamento é de 10 m. A distância do eixo transversal ao alinhamento do esporão da Vagueira é de 460 m. A inclinação do talude de barlamar é de 1:10 e do talude de sotamar de 1:2.

Para o surf, a orientação proposta do QMD é oblíqua a 45º graus relativamente à linha de costa.

2.2 Ensaios em modelo físico

Os ensaios em modelo físico foram realizados nas instalações experimentais do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC, no tanque de ondas irregulares com aproximadamente 23.0 m de comprimento por 20.0 m de largura. A geração de ondas foi feita com recurso a dois geradores de ondas irregulares cujas pás têm 6.0 m de largura e 0.8 m de altura.

O modelo foi construído e explorado de acordo com a lei de semelhança de Froude a uma escala geométrica de 1/65. O modelo físico foi implantado sobre fundo móvel que reproduz as condições do protótipo desde uma batimétrica da ordem de -12 m (ZH) até junto à costa. A Figura. 2 mostra a planta do modelo físico executado, a posição das linhas batimétricas do fundo e dos geradores de ondas e a posição do QMD obliquo a 45º à linha de costa.

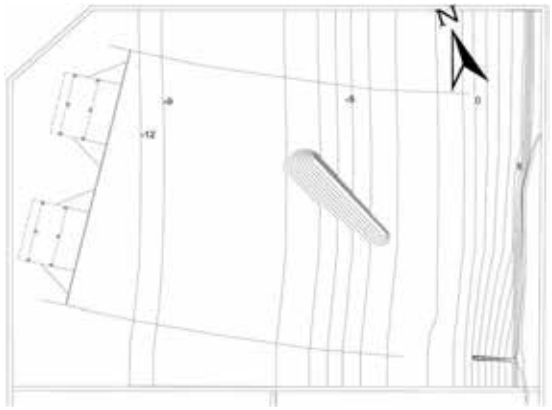


Figura. 2. Planta da implantação

Este QMD foi construído à escala reduzida em módulos de betão com uma rugosidade exterior o mais aproximada possível da de um manto de enrocamento, Figura. 3.

Para a medição da agitação marítima no modelo físico, utilizaram-se sondas resistivas (Figura. 4). Foram utilizadas 8 sondas, duas em frente ao gerador (S1e S2) para confirmação das alturas e períodos de onda incidentes e 6 sondas que foram colocadas em diferentes pontos assinalados no modelo físico (S3 a S8).

Assim, foram colocadas 6 sondas (S3 a S8) ao longo de um dado perfil (P3 a P7) definidos no tanque e distanciadas entre si de 1 m. Estas sondas foram colocadas em suportes fixos num carro móvel de forma a poderem mudar de posição na direção paralela à direção de propagação das ondas, Figura. 4.

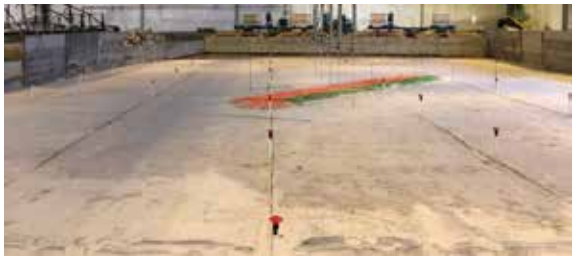


Figura. 3. Modelo físico, com o QMD rodado de 45º em relação à linha de costa

Os registos fotográficos e em filme foram feitos com recurso a máquinas fotográficas de utilização corrente. Foram também instaladas 2 câmaras de filmar para análise da localização, comprimento e tipo de rebentação na zona do QMD e na costa associados a cada condição de agitação marítima incidente, Figura. 5.

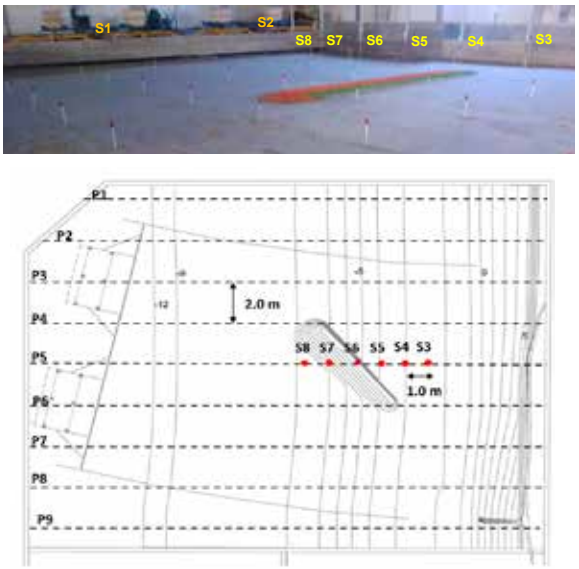


Figura. 4. Equipamento experimental (sondas) e esquema com o posicionamento das sondas



Figura. 5. Equipamento experimental (máquinas fotográfica e de filmar)

Foram realizados ensaios de agitação irregular e regular com os níveis de baixa-mar e preia-mar de água, BM (+1.18 m ZH) e PM (+3.05 m ZH), e rumo de 296ºN. As condições de agitação (regular e irregular) selecionadas foram: alturas de onda

Hs=H=1.5, 2 e 3 m e períodos T=Tp=10 e 12 s. Os ensaios com ondas regulares e irregulares tinham uma duração de 5 min e 22 min, respetivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os registos medidos em cada sonda, foi efetuada uma análise espetral dos sinais, para obtenção da altura de onda significativa e período de pico respetivos. Com base nesses valores, foram calculados índices de agitação através da relação entre a altura de onda significativa medida em cada um dos pontos referidos anteriormente e a média das alturas de onda significativas registadas nas duas sondas colocadas à saída do gerador (H/H0), situadas na batimétrica -12.0 m (ZH), para cada ensaio.

A identificação da posição da linha de rebentação foi baseada na observação visual e nas filmagens efetuadas durante os ensaios, que permitiram ainda a análise do comprimento e tipo de rebentação na zona do QMD.

Na Figura. 6 e Figura. 7 apresentam-se os índices de agitação obtidos nos ensaios de BM e PM, com T=12 s, para diferentes alturas de onda incidente e para os perfis P4 e P5 (apresentados na Figura. 4). Nestes gráficos, o eixo das abcissas tem início na linha de costa e a cota batimétrica dos perfis (à escala do protótipo) tem a sua origem à cota -9 m (ZH).

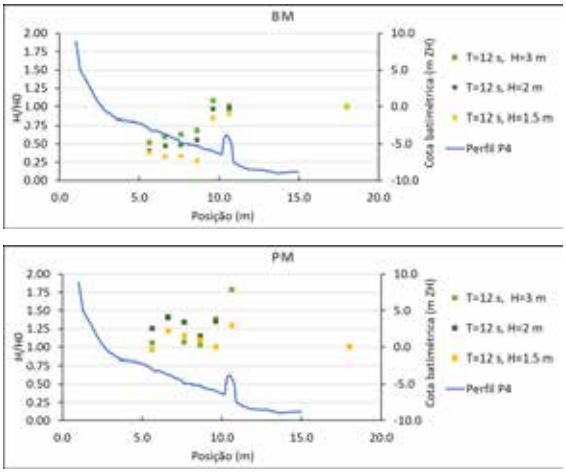


Figura. 6. Perfil P4. Índices de agitação para BM (cima) e PM (baixo), T=12 s, H=1.5, 2 e 3 m

No que se refere à influência da altura de onda nos resultados obtidos (Figura. 6 e Figura. 7) verifica-se, de um modo geral, que à medida que a altura da onda aumenta, aumenta o índice de agitação, como esperado. No perfil P4 (Figura. 6) a rebentação ocorre sobre a estrutura (coroamento e talude de sotamar) e no perfil P5 (Figura. 7Figura. 6) a rebentação ocorre no talude de barlamar. É de notar que a secção do QMD no perfil P4 encontra-se a uma maior profundidade, a rebentação ocorre sobre a estrutura ou no talude de sotamar. O QMD no perfil P5 está a uma menor profundidade, em relação ao perfil P5, ocorrendo a rebentação da onda no talude de barlamar.

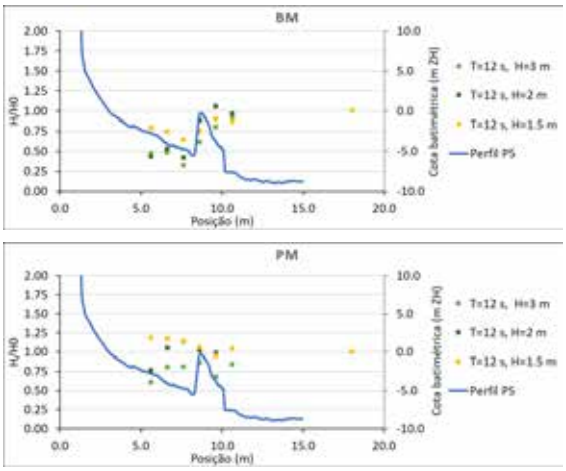


Figura. 7. Perfil P5. Índices de agitação para BM (cima) e PM (baixo), T=12 s, H=1,5, 2 e 3 m

Figura. 8Figura. 8 e Figura. 9 apresentam-se os índices de agitação obtidos nos ensaios de BM e PM, com H=1.5 m, para os períodos de onda incidente, T=10 s e T=12 s, para os perfis P4 e P5.

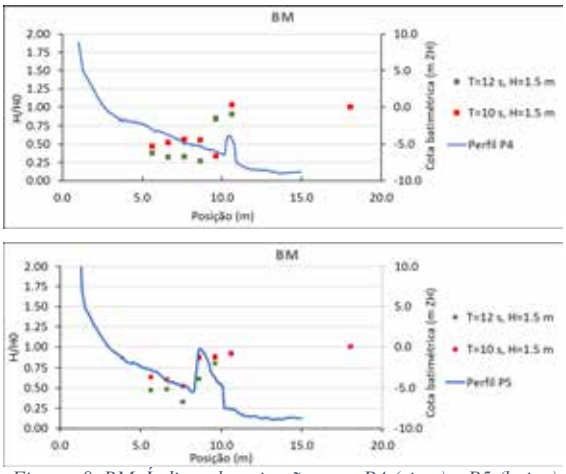


Figura. 8. BM. Índices de agitação para P4 (cima) e P5 (baixo), T=10 e 12 s, H=1.5 m

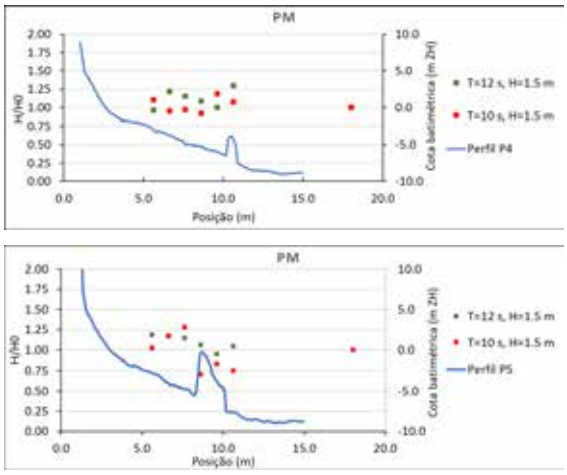


Figura. 9. PM. Índices de agitação para P4 (cima) e P5 (baixo), T=10 e 12 s, H=1.5 m

Com base na Figura. 8 e Figura. 9, verifica-se que para o nível de BM, para os dois períodos de onda, no

perfil P4, a rebentação ocorre no talude de sotamar da estrutura e, no perfil P5, a rebentação ocorre sobre a estrutura. Para o nível de PM não é evidente a existência de rebentação nos perfis P4 e P5.

Na Figura. 10 apresenta-se a linha de rebentação observada nos ensaios com BM e PM, para as condições de agitação regular T=12 s, com H=1.5 a 3 m.

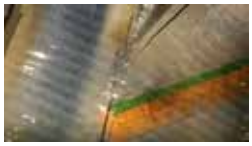
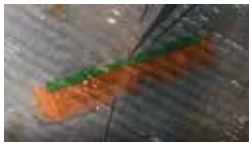
BM	PM
T=12 s, H=1.5 m 	T=12 s, H=1.5 m 
T=12 s, H=2 m 	T=12 s, H=2 m 
T=12 s, H=3 m 	T=12 s, H=3 m 

Figura. 10. Linha de rebentação para BM (esq.) e PM (dir.), T=12 s e H=1.5 a 3 m

Verifica-se que as frentes de onda tenderam a ajustar-se à batimetria do QMD, alterando-se a direção de propagação da onda e as condições de rebentação, tornando as mais apropriadas para a prática de surf.

Para o nível de BM a rebentação dá-se sobre a estrutura, é do tipo mergulhante e ocorre de forma gradual, sendo assim adequada para a prática de surf. Para o nível de PM, T=10 e 12 s e H=1.5 m, não se observa rebentação junto à estrutura. Para as condições de agitação T=12 s e H=2 e 3 m, a rebentação dá-se sobre a estrutura, é do tipo mergulhante e ocorre de forma gradual, sendo assim adequada para a prática de surf.

4. CONCLUSÕES

Apresentam-se neste artigo os ensaios realizados para analisar a influência da orientação de um QMD relativamente à linha de costa - com uma obliquidade de 45 º - nas condições de rebentação da onda e nos parâmetros de surfabilidade.

Dos resultados experimentais relativos aos índices de agitação e da análise visual dos ensaios é possível concluir que, para as condições de agitação ensaiadas:

- O QMD tem influência sobre as condições de rebentação, levando a que estas ocorram na zona próxima ou sobre o QMD;
- Ocorreu um aumento dos índices de agitação na zona do QMD devido à diminuição de profundidade e empolamento da onda, com posterior ocorrência de rebentação;
- Relativamente à linha de rebentação observada nos ensaios, para as condições de agitação regular ensaiadas a rebentação é do tipo mergulhante e ocorre de forma gradual sendo adequada para a prática de surf.

Agradecimentos

Os resultados decorrem parcialmente do Programa coordenado pela Agência Portuguesa do Ambiente e cofinanciado pelo POSEUR - Programa Operacional Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos (referência POSEUR-02-1809-FC-000039). Agradece-se aos projetos Bsafe4Sea (Ref. PTDC/ECI-EGC/31090/2017), EWCOAST (ALG-LISBOA-01-145-FEDER-028657) e To-SEAlert (Ref. PTDC/EAM-OCE/31207/2017).

REFERENCES

Mendonça, A.; Martinez, C., Neves, M.G.; Fortes, C.; Reis, R.; Bicudo, P.; Sancho, F. (2022). Modelação física de um quebra-mar destacado com diferentes ângulos de implantação: análise comparativa das condições de surfabilidade . 10as JPECP. Sines, 7 e 8 de abril de 2022.

Oliveira, F.S.B.F., Sancho, F., Neves, M.G., Coelho, C., Pinheiro, L., Fortes, C.J.E.M., Teixeira, S., Pombo, R., Reis, M.T. (2020). Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira. (T1) Estudos em modelo matemático: Alternativas de quebra-mar destacado para proteção contra galgamentos e erosão costeira – Relatório 8. Rel. 231/2020, LNEC.

Sancho, F.; Neves, M.G.; Fortes, C.J.E.M.; Capitão, R. (2019). Estudo de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à praia da Vagueira. (T1) Estudos em modelo matemático: Memória descritiva – Relatório 4. Rel. 408/2019, LNEC.

Sancho, F., Neves, M.G., Fortes, C.J.E.M., Silva, L.G. (2021). Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à praia da Vagueira. (T2) Estudos em modelo físico reduzido: Estabelecimento do modelo físico – Relatório 12. Rel. 408/2021, LNEC.

Wave Overtopping at Ericeira harbour. Validating SWASH and NN_OVERTOPPING2 estimations with video.

A. Zózimo (1), A. Manz (1), J. Garzon (2), C. Fortes (1), M. Reis (1), R. Capitão (1), R. Taborda (3), A. Silva (3)

(1) Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal. aczozimo@lnec.pt

(2) CIMA – Centre for Marine and Environmental Research, FCT, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal.

(3) Instituto Dom Luiz, Universidade de Lisboa.

Abstract: The To-SEAlert project has the aim of increasing the efficiency, robustness and reliability of the HIDRALERTA system. One of its tasks is to implement and test numerical models to estimate wave overtopping in order to complement/replace the neuronal network overtopping tool (NN_OVERTOPPING2) currently available in HIDRALERTA. Here, we investigate the perfomance of the HIDRALERTA system and process-based model (SWASH) to predict overtopping discharges at two profiles at the trunck and the head of Ericeira breakwater by comparing their results against information taken by a video-monitoring system. This comparison reveals that, in the overall, HIDRALERTA presented a better match than SWASH for the trunk profile and a worse performance for the head profile. SWASH overestimated the overtopping discharges of HIDRALERTA and the corresponding alerts issued by the system.

keywords: Early Warning Systems, HIDRALERTA, To-SEAlert, video-monitoring, wave overtopping.

1. INTRODUCTION

While the world's population continues to grow and concentrate in coastal areas, communities become more vulnerable to flooding and erosion caused by extreme ocean events. Often socio-economic activities rely on the ability of coastal structures to reduce the impacts of wave-induced flooding, which has a negative impact on society, environment and economy. Early Warning Systems (EWSs) have been identified as important tools that anticipate emergency situations and initiate the necessary safety procedures (Lavell *et al.*, 2012).

In Portugal, a country highly exposed to coastal hazards, no fully operational national flood forecast and early warning system exists yet. The HIDRALERTA system aims to fill this gap (Poseiro, 2019, Fortes *et al.,* 2020), as it is a wave overtopping and flood forecast system with early warning and risk assessment capabilities. This system can identify emergency situations in coastal and harbour areas 72 hours in advance. The system is running in a real-time mode and uses the neuronal network tool NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005) to compute mean overtopping discharges, q, at each cross-section of a structure. When pre-set thresholds for q are exceeded, warnings are triggered and forecasts are sent to decision-makers. Within the scope of the To-SEAlert project (whose main objectives are to increase the efficiency, robustness and reliability of the HIDRALERTA system), the numerical model SWASH (Zijlema *et al.*, 2011) was calibrated for two different breakwater profiles of the Ericeira harbour and empirical expressions were developed to automatically obtain the Manning friction coefficient for the tetrapod and antifer armour layers of the profiles (Manz, 2021). In this study, wave overtopping estimations provided by NN_OVERTOPPING2 and SWASH of selected events were validated against data collected by the video-monitoring system implemented at Ericeira harbour, to investigate the performance of each tool.

2. METHODS

2.1. Study site

The Ericeira harbour, on the west coast of Portugal, is sheltered by a 430 m long breakwater, oriented to the south-west, with a quay in the rear side (Fig. 1).

Two breakwater profiles were chosen to perform the simulations: Profile-T is located at the trunk of the breakwater, has an armour layer of tetrapods and an orientation of 309°N; Profile-A is located at the head of the breakwater, its armour layer consists of antifer cubes, and has an orientation of 262°N. The profiles differ in their slope, the crest freeboard, R_c, the armour freeboard, A_c, and the width of the crest, G_c (Fig. 1).

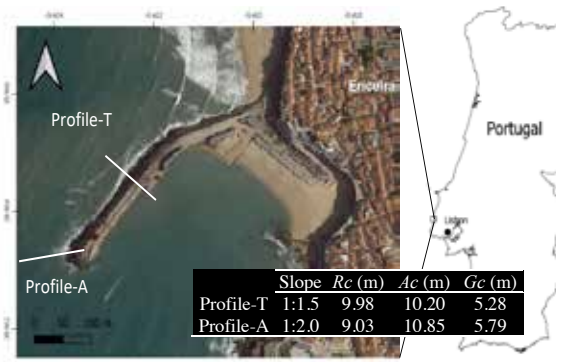


Fig. 1. Location of Ericeira harbour and of profiles T and A.

2.2. Wave overtopping predictions

To obtain the wave overtopping predictions, wave conditions were extracted with the approach used in HIDRALERTA for the selected events, which covered overtopping and no- overtopping conditions. The offshore boundary conditions were acquired from ECMWF forecasts (wind and wave characteristics) and were propagated to the shore by using numerical wave propagation models SWAN (SWAN Team, 2006) and DREAMS (Fortes, 2002). The astronomical tide was obtained with the XTIDE model ((https://flaterco.com/xtide/).). Then, based on the extracted local oceanic conditions and the profile characteristics, NN_OVERTOPPING2 computed overtopping discharges. The numerical set-up for the simulations performed with the SWASH model can be found in Manz (2021).

2.3. Validation with video images

For the selected events, videos were analyzed for identifying overtopping occurrences. A total of 104 videos were analysed. Due to the range of applicability of the expressions for the definition of Manning friction coefficients for Profile-T and Profile-A (Manz, 2021), not all of the events could be simulated. The number of events used for each comparison is presented in Tab. i.

Tab. i. Number of events used in the analysis

Comparison between	Profile-T	Profile-A
SWASH *vs*. HIDRALERTA	65	17
SWASH *vs*. Video	44	14
HIDRALERTA *vs*. Video	104	102

Then, the information extracted from the images was used to categorize the risk levels as presented in Tab. ii. After the video analysis, the mean overtopping discharges computed with SWASH and NN_OVERTOPPING2 (hereafter refered to as HIDRALERTA) were used to determine the risk level of the overtopping events based on discharge thresholds (see Tab. ii). Finally, the risk levels observed and predicted were compared. These levels were applied to the following receptors: pedestrians (Profile-T and Profile-A), vehicles on the breakwater (Profile-T) and the structural elements (breakwater itself, Profile-T and Profile-A).

3. RESULTS AND DISCUSSION

For pedestrians at Profile-T (Fig. 2a), SWASH mainly gives higher alerts than HIDRALERTA (49% of the events), originating the same risk level for 35% and a lower risk level for 16% of the events. Regarding the comparison with the video, SWASH overestimates the alerts in 68% of the events, from which 32% in three levels. The match is only obtained for 25% of the events and a small part (7%) is underestimated. When comparing HIDRALERTA results with the video images, the match is better (61%), although it underestimates the video alerts in 24% of the events and overestimates in 16%.

For vehicles on Profile-T (Fig. 2b), SWASH performance is better than for pedestrians, where 75% of the cases agree with the observations, against 82% of HIDRALERTA. SWASH overestimates or underestimates the video only up to one level, while HIDRALERTA, although with a higher match, underestimates or overestimates up to two levels of alert. Comparing SWASH with HIDRALERTA, a match of 82% was obtained, with an overestimation of 14% and an underestimation of 5%.
For pedestrians on Profile-A (Fig. 2c), SWASH and HIDRALERTA have a 100% match. Regarding the comparison with the video observations, SWASH highly overestimates the alerts (94% of the events, with a similar distribution over the number of risk levels) and only obtained a 7% match.
HIDRALERTA also overestimated the video alerts in 97% of the events (with 51% in three levels), only presenting matches in 2%.

Altough not shown here, the observed and predicted risks for the structural elements were always green, and therefore the match was perfect.

Tab. ii. Risk level definition used in the video images analysis and HIDRALERTA overtopping thresholds (in brackets).

Risk Level	Pedestrians	Vehicles	Structural elements
No Risk	No injuries [<0.1 l/s/m]	Safe to drive [<10 l/s/m]	No damage [<200 l/s/m]
Low Risk	Minor injuries [0.1-0.5 l/s/m[	Light motorbikes or bicycles become unstable [10-25 l/s/m[	Movements and fall of blocks, without need of immediate repair [200-300 l/s/m[
Moderate Risk	Multiple minor injuries or some serious injuries [0.5–1.0 l/s/m[	Serious damage that affect its use, but without temporary stoppage [25-50 l/s/m[	Fall of blocks with filter exposure. Superestructure affected [300-400 l/s/m[
High Risk	Multiple serious injuries and/or loss of lives [≥1.0 l/s/m]	Serious damage that don't allow its use [≥50.0 l/s/m]	Filters damaged; significant movements of the superestructure; eventual collapse [≥400 l/s/m]

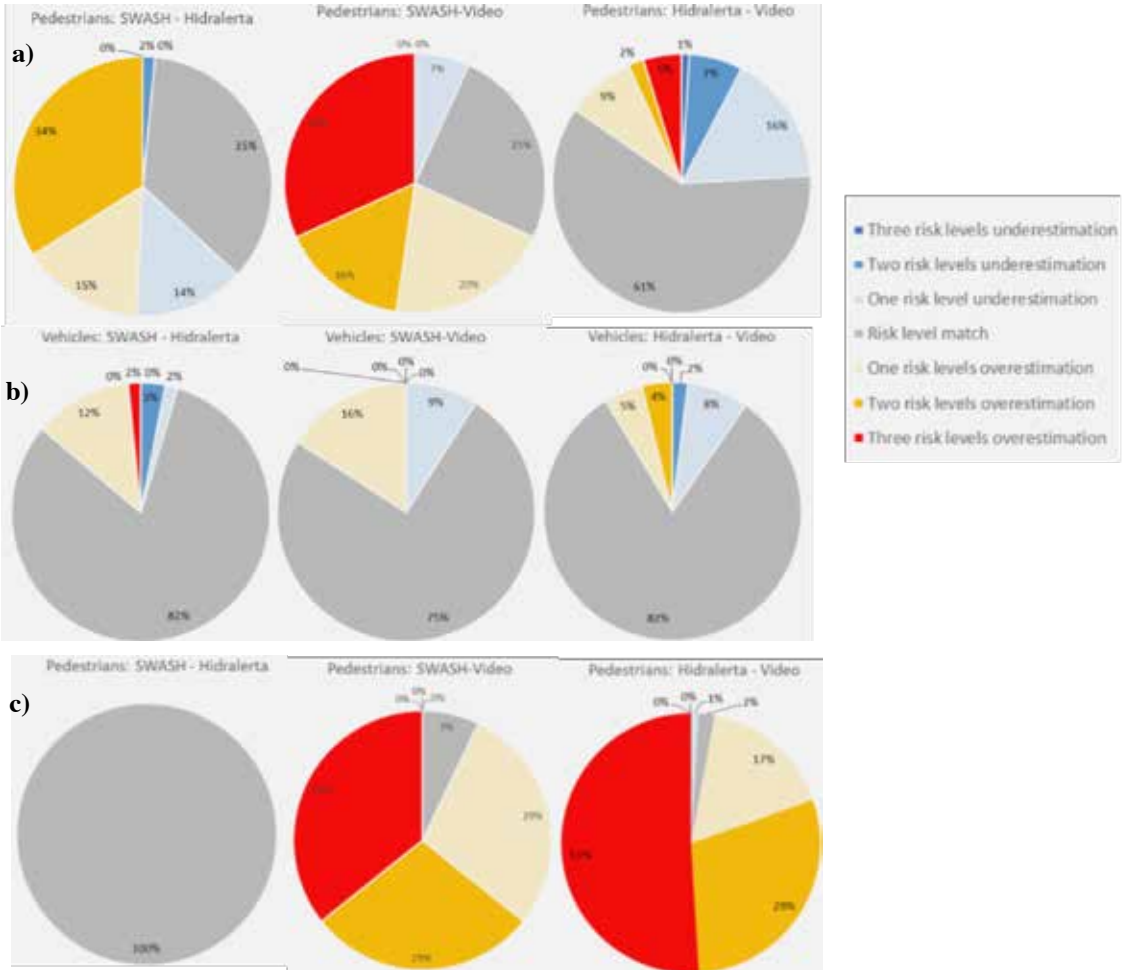


Fig. 2. Comparison of results between SWASH and HIDRALERTA and validation of SWASH and HIDRALERTA results with the video images. a) Profile-T, Risks for Pedestrians, b) Profile-T, Risks for Vehicles, c) Profile-A, Risks for Pedestrians.

It was found that the lower the thresholds for the alert levels, the worse was the performance of both SWASH and HIDRALERTA. HIDRALERTA performed better than SWASH for Profile-T (pedestrians and vehicles) and worse for Profile-A (pedestrians). The discrepancies for HIDRALERTA and SWASH can be due to bathymetric and breakwater representation issues (the bathymetry used is from 2011 and the structure had repair works after December 2019 storms that are not reflected in the profiles used). Also, some of the videos were taken from a location that did not allow a clear view of the profile and in other cases, the visibility was poor due to fog and rain. Finally, it is not easy, when analysing the videos, to define levels of alert, especially for pedestrians. Some splashes were considered as green level in the video analysis, but due to the very low threshold for a green warning in HIDRALERTA and SWASH (<0.1 l/s/m) the alert level can be higher than the one from the video. Fig. 3 and Fig. 4 present the comparison of q estimated by SWASH with q estimated by HIDRALERTA and the values of the following statistical parameters: *BIAS* and correlation coefficient (r):

$$BIAS = \bar{S} - \bar{H} \quad \text{(E1)} \qquad r = \frac{\sum_{i=1}^{N}[(H_i-\bar{H})(S_i-\bar{S})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(H_i-\bar{H})^2 \sum(S_i-\bar{S})^2}} \quad \text{(E2)}$$

where S_i are SWASH q values, H_i are HIDRALERTA q values, $\bar{S}$ and $\bar{H}$ are, respectively, the average of SWASH and HIDRALERTA q values.

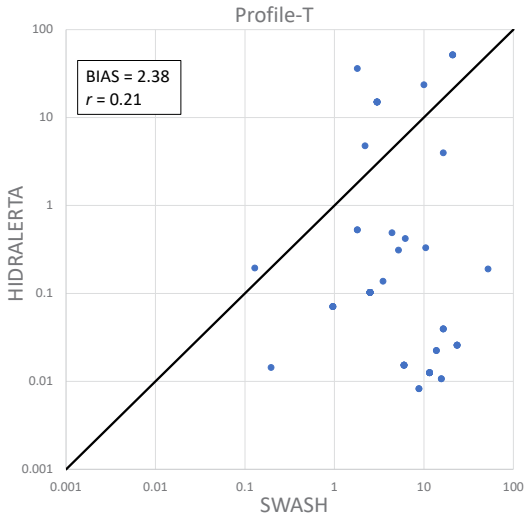


Fig. 3. Profile-T. Comparison of q estimated by SWASH with q estimated by HIDRALERTA.

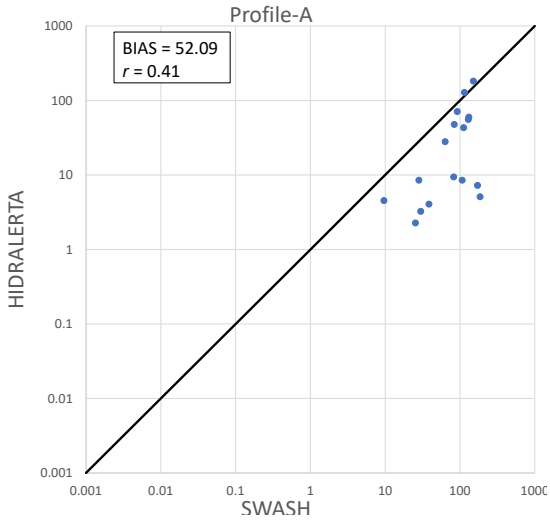


Fig. 4. Profile-A. Comparison of q estimated by SWASH with q estimated by HIDRALERTA.

From the statistical analysis, it can be seen that SWASH originates higher discharge values than HIDRALERTA, and the correlation was not good for both profiles. The very high discharges in the SWASH model can be due to the very low values of the Manning coefficient obtained from the empirical expressions for the analysed events. Those values were very often near or equal to the minimum value allowed (0.02 $s/m^{1/3}$). Even if SWASH highly overestimated HIDRALERTA, when this was translated into an alert level, both systems could obtain a high level of agreement (e.g. pedestrians on Profile-A). The reason is that for values higher than the high risk theshold, it results in the same alert level regardless of the difference in *q* values.

4. CONCLUSIONS

It was concluded that overall HIDRALERTA presented a better agreement with the observations than SWASH for Profile-T (pedestrians and vehicles) and a worse performance for Profile-A (pedestrians). When comparing SWASH and HIDRALERTA, SWASH overestimated both the alerts and the discharges.

The high discharges for HIDRALERTA and SWASH can be due to bathymetric and breakwater representation issues. Due to dredging works and to the fact that the area is prone to accretion, the bathymetry has to be updated. A drone survey of the breakwater from early 2022 is already available and can be used to update the profile conditions. The video analysis also presents some challenges, due to the camera location and the poor visibility during storm conditions. Moreover, the classification of risk levels from the video imagery relied on expert judgment and therefore the interpretation can be biased. More work on SWASH simulations is also needed, including the increase in the range of applicability of the empirical expressions for the Manning coefficient.

Acknowledgments

The authors acknowledge the research projects To-SEAlert (PTDC/EAM-OCE/31207/2017), EW-COAST (ALG-LISBOA-01-145- FEDER-028657), NAVSAFETY (Fundo Azul, FA_04_2017_013) and BSafe4Sea (Ref. PTDC/ECI-EGC/31090/2017) for their availability to provide videos and CIMA through grant UIDP/00350/2020. Infraestrutura Nacional de Computação Distribuída (INCD) is also acknowledged for the access to their computational resources, as well as Posto Territorial de Mafra da GNR.

REFERENCES

Coeveld, E. M., van Gent, M. R. A., & Pozueta, B. (2005). Neural network manual for NN_Overtopping program.

Fortes, C. J. E. M. (2002). Transformações Não Lineares de Ondas em Zonas Portuárias. Análise pelo Método dos Elementos Finitos (Doctoral Dissertation). IST-UL.

Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., Pinheiro, L., Poseiro, P., *et al.* (2020). The HIDRALERTA system: Application to the ports of Madalena do Pico and S. Roque do Pico, Azores. Aquatic Ecosystem Health & Management, 23(4), 398–406.

Lavell, A., Oppenheimer, M., Diop, C., Hess, J., *et al.* (2012). Climate Change: New Dimensions in Disaster Risk, Exposure, Vulnerability, and Resilience. In C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, & Q. Dahe (Eds.), Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (pp. 25–64). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.004

Manz, A. (2021). Application of SWASH to determine overtopping during storm events in the port of Ericeira and its introduction into HIDRALERTA system. Univ. Algarve.

Poseiro, P. (2019). Forecast and Early Warning System for Wave Overtopping and Flooding in Coastal and Port Areas: Development of a Model and Risk Assessment (Doctoral Dissertation), IST-UL.

SWAN TEAM (2006). Swan User Manual version 40.51. Department of Civil Engineering and Geosciences, Delft university of Technology, Delft, The Netherlands, 111 pp.

Zijlema, M., Stelling, G., & Smit, P. (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. Coastal Engineering, 58(10), 992-1012.

The EU project RAMONES – continuous, long-term autonomous monitoring of underwater radioactivity

P. Batista (1), D. Cabecinhas (1), L. Sebastião (1), A. Pascoal (1), T. Mertzimekis (2), K. Kebkal (3), A. Mallios (4), K. Karantzalos (5), K. Nikolopoulos (6), J. Escartín (7), L. Maigne (8)

(1) Institute for Systems and Robotics, Laboratory for Robotics and Engineering Systems, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. pbatista@isr.tecnico.ulisboa.pt

(2) National and Kapodistrian University of Athens, Athens, Greece.

(3) EvolLogics GmbH, Berlin, Germany.

(4) Ploa Technology Consultants S.L., Girona, Spain.

(5) National Technical University of, Athens, Athens, Greece.

(6) University of Durham, Durham, UK.

(7) PSL University, Paris, France.

(8) Université Clermont Auvergne, Clermont Ferrand, France.

Abstract: While radioactivity has always existed in the marine environment due to natural phenomena, artificial sources have made their way into the oceans more recently, either through low-level liquid discharges from reprocessing plants, more threatening large-scale spills due to nuclear disasters, or smaller-scale radiological events. Unchecked, radioactivity poses life-threatening risks to marine ecosystems and, ultimately, to humanity. Notwithstanding, radioactivity in the oceans is, to a very large extent, undersampled. The main goal of the RAMONES project is to offer a novel systematic solution for long-term, continuous in situ monitoring of radioactivity in the oceans, contributing also towards novel environmental intelligence policies. In this communication, an overall in-depth description of the overall robotic architecture is offered. This includes a fleet of an autonomous surface vehicle, two autonomous underwater gliders, and a static benthic laboratory, all equipped with radiological instruments: high resolution instruments installed on the fixed node and gamma-sniffers onboard the mobile nodes.

Key words: adaptive sampling, autonomous vehicles, environmental intelligence, radioactivity, underwater monitoring.

1. INTRODUCTION

Water masses, covering more than two thirds of the planet's surface, are of vital importance to the sustainability of human life. In many ways, oceans and seas regulate our climate: they absorb heat in some regions and transport it elsewhere, effectively distributing heat across the planet. Without this planet-wide regulation system, the weather would be extreme in many regions, and some would even be uninhabitable. The oxygen/carbon dioxide balance is also largely maintained by the oceans. While it is popular belief that rainforests are the main producers of oxygen, scientists estimate that more than half of the oxygen production occurs in the oceans, with highest estimates reaching 80%. Unsurprisingly, oceans also play a key role in the carbon cycle: scientists estimate that the oceans absorb between 30 to 50% of the CO2 produced by the burning of fossil fuel. Water masses also hold an important part of the planet's biodiversity and, in effect, are also becoming a very important source of food for the ever-increasing Earth's population.

Radioactivity in marine environments has always been present since the formation of Earth through the so-called naturally occurring radioactivity materials. This kind of radioactivity usually refers to isotopic chains originating from long-lived uranium and thorium isotopes, posing a low but long-term risk in ecosystems. In the last century, artificial radioactivity found its way into the oceans. Common sources include low-level liquid discharges from reprocessing plants, large-scale releases due to natural disasters, and smaller-scale radiological events, such as nuclear vessels wrecks or marine disposal of nuclear material. Anthropogenic radioactivity potentially poses significant health risks. Yet, worldwide monitoring of radioactivity in marine environments is poor and limited to very few sites.

The H2020 EU project RAMONES - Radioactivity Monitoring in Ocean Ecosystems – will design, develop, and validate a novel systematic solution for long-term, continuous in situ monitoring of radioactivity in the oceans, contributing also towards novel environmental intelligence policies. Highly multidisciplinary, several key sub-objectives will be

addressed, including: i) the design, development, and validation of a broad set of novel instruments for measuring underwater radioactivity; ii) the design, development, and validation of novel collaborative, adaptive, and self-aware marine robots for efficient operation and sensing using new marine radiometry instrumentation; iii) the design, development, and validation of novel environmental modelling methodologies for processing and modelling of marine radioactivity multi-modal data; iv) the introduction of novel monitoring and response channels to inform key socio-political stakeholders at regular intervals, effectively contributing to raising environmental intelligence; and v) the increase of local/citizen awareness and involvement in environmental intelligence issues, through scientific evidence and FAIR data principles.

From a macroscopic point-of-view, the RAMONES concept is composed of a set of radiological instruments installed on-board: i) a static benthic radiological laboratory, deployed on the seabed; ii) two autonomous underwater gliders (AUGs); and iii) one autonomous surface craft (ASC). These autonomous vehicles, equipped with novel radioactivity sensors, effectively constitute a disruptive and innovative concept to autonomously and adaptively monitor radioactivity in underwater environments through sensing, communication, control, and adaptation. A simplified sketch of the nodes of the proposed concept is depicted in Fig. 1. In this communication, an overview of the envisioned robotic architecture is provided.

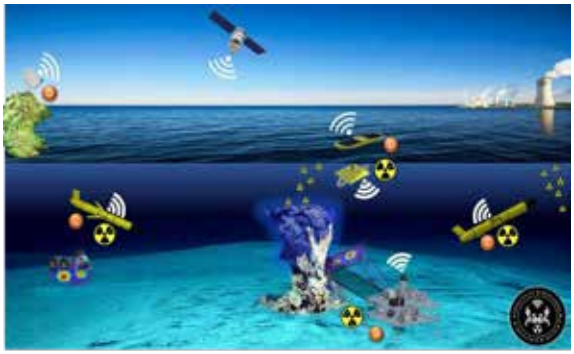


Fig. 1. A simplified sketch of the nodes of the RAMONES concept.

2. ROBOTIC ARCHITECTURE

The proposed robotic architecture consists of three mobile nodes – one autonomous surface ship and two autonomous underwater gliders – and a fixed node – a static benthic laboratory. To the purpose of fulfilling the scientific mission requirements, all these nodes are equipped with heterogeneous radiological instruments, which offer precious information to guide the system. The focus of this communication is on the robotic aspect of the system.

In the envisioned architecture, each node has well-defined objectives, as follows. The autonomous surface craft, typically an autonomous sailboat, serves as a communication relay node. Moreover, equipped with a positioning system, it is effectively part of the navigation system of the AUGs. Confined to the surface, if offers radiological measurements of the top layer of the water column. The AUGs are mobile sensing nodes that dwell on the water column, typically through yo-yo movements along the vertical plane. To georeference the acquired data, as well as to enable automatic control, navigation data is essential, hence these vehicles are also equipped with navigation aids. The benthic laboratory, in additional to sensing capabilities, is also equipped with positioning systems to aid the mobile nodes. It is important to remark that the choice of the vehicles is not innocent. Indeed, AUGs potentially offer much greater autonomy than standard propelled autonomous underwater vehicles. The same applies to autonomous sailboats.

In what concerns the robotic system, and considering high-level objectives, there are essentially two key technological challenges: i) cooperative navigation of multiple autonomous marine vehicles; and ii) adaptive motion planning and cooperative control. A simplified sketch of the commands, control and navigation network is depicted in Fig. 2.

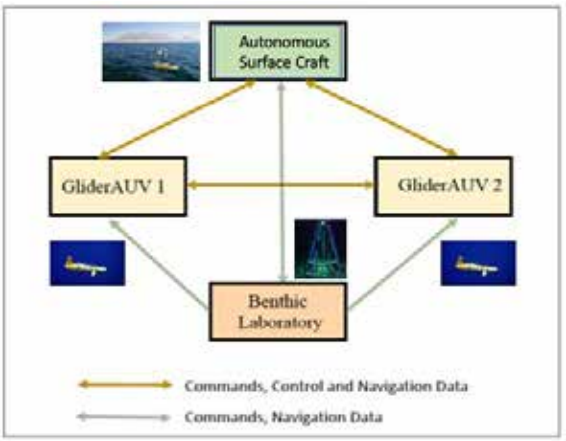


Fig. 2. The RAMONES commands, control, and navigation network.

2.1. Cooperative navigation

The navigation system of a (possibly autonomous) vehicle is responsible for determining estimates of its position, attitude, and linear and angular velocities, effectively answering questions like: i) where is the vehicle? ii) where is the vehicle pointing to? iii) how fast is the vehicle moving? and iv) how fast is the vehicle turning? In certain scenarios, the navigation system also provides estimates or measurements of additional quantities, e.g. ocean and/or wind currents, relative velocity to the fluid, etc.

Global navigation satellite systems (GNSS), like the global positioning system (GPS) or GALILEO – the European global navigation satellite system, offer precise cheap positioning, when available, and are typically the preferred choice. In this project, the navigation system of the ASC will be based on GNSS. Nevertheless, to improve its precision, other

sensors will be considered, e.g. accelerometers, an attitude and heading reference system, and wind sensors. Using filtering/estimation algorithms, the information acquired by the sensor suite will be fused, in real-time, to obtain not only filtered estimates of already sensed quantities but also estimates of quantities that are not directly measured. In (Vasconcelos et al., 2011) a navigation system developed for the DELFIMx catamaran, an ASC developed at the Institute for Systems and Robotics – Lisboa / Institute Superior Técnico is experimentally evaluated. This navigation system, based on complementary filtering, fuses strapdown inertial measurements, vector observations, and GPS, providing attitude estimates in Euler angles representation and position estimates in Earth frame coordinates, while compensating for rate gyro bias.

The navigation system of the AUGs is considerably more complex due to several reasons. First, GNSS is unavailable underwater due to the attenuation of the electromagnetic waves in this medium. Thus, other positioning systems must be considered, the majority of which are based on acoustic signalling. Second, underwater acoustic positioning systems suffer from some serious bottlenecks/intricacies. Indeed, low speed of propagation of acoustic waves in water and multi-path lead to significant challenges, which usually result in low sampling rates. Third, in the particular setting of RAMONES, strict energy constraints must be met in order to empower the AUGs with greater autonomy. Thus, instead of periodic sensing, appropriate on-demand requests may be considered. Fourth, high-accuracy dead-reckoning systems are not an option due to their size, weight, cost and power characteristics.

In the envisioned scenario, a flexible setting is considered, whereby all vehicles are equipped with full ultra-short baseline (USBL) accousting positioning systems, composed of USBL heads (with USBL receiver array heads) and transponders. In optimal conditions, the USBL acoustic positioning systems are able to determine the position of the transponders with respect to the USBL heads, expressed in their reference coordinate frames. Since all vehicles are equipped with these, all vehicles will be able to determine the positions of their neighbours with respect to themselves. Through communication, and using the ASC as the inertial position provider, all vehicles are able to determine their own inertial positions. In sub-optimal conditions, the USBLs gather only inter-distance measurements between the vehicles, effectively constituting a ranging system. While this mode offers much less information, it is still of great use in improving the accuracy of the navigation system of the AUGs in the absence of position measurements.

Examples of USBL-based navigation systems for position and velocity determination with full positioning measurements can be seen in (Batista et al., 2010) and (Morgado et al., 2011), whereas in (Morgado et al., 2012) a solution for attitude estimation taking advantage of USBL position measurements is proposed. The Kalman filter is the workhorse of these solutions, all offering, under very mild assumptions, theoretical guarantees of global convergence and stability – key properties for autonomous, safe operation.

The scenario with range-only measurements is considerably more complex due to the nonlinear nature of these measurements and the fact that the system is not instantaneously observable. In fact, some persistency of excitation condition must be met, through sufficiently rich trajectories, such that the resulting estimation error dynamics are globally stable and convergent. Pioneering examples of single-range and multiple-range navigation systems for single vehicles can be found in (Batista et al., 2011) and (Batista et al., 2014), where vehicles in tandem and formations were considered in (Viegas et al., 2014) and (Viegas et al., 2016).

The envisioned cooperative navigation system for the AUGs will take advantage of the flexibility offered by the USBL positioning systems installed on-board all vehicles and will switch between different modes of operation, depending on the conditions of operation (position vs. range measurements) and energy constraints (periodic sampling vs. on-demand position/range requests). The ASC will provide inertial references through communication and simple kinematic/dynamic models will be considered for the AUGs, for dead-reckoning purposes, possibly considering the presence of inertial sensors installed on-board the AUGs. Self-driven or event-driven control techniques will be employed to balance the estimation error covariance and the energy consumption.

2.2. Adaptive motion planning and cooperative control

The RAMONES project requires the concerted operation of an ASC and 2 AUGs to detect and map the extent of radioactive sources underwater. For this purpose, besides the cooperative navigation system described previously, the RAMONES mini-fleet of vehicles will be equipped with the systems responsible for: i) generating search paths on-line (adaptive or event-driven motion planning, where the events are the occurrence of radioactivity levels above the background level) and ii) performing cooperative motion control, whereby the vehicles maneuver in synchronism to follow desired paths, based on the navigation data acquired on-line and by exchanging control-related data over the underlying acoustic communication network. The methodologies developed will build upon extensive work done at the Institute for Systems and Robotics / Instituto Superior Técnico over the years on motion planning and cooperative motion planning of autonomous air,

surface, and underwater vehicles, see for example (Kaminer et al., 2017), (Rego et al., 2019), (Cichella et al., 2021) (Simetti et al., 2020), (Hung et al., 2020), (Hausler et al., 2016) and the references therein. Special emphasis will be placed on the use of event-driven cooperative motion control algorithms with a view to substantially reduce the amount of information exchanged among the heterogeneous vehicles (Hung et al., 2020).

Acknowledgements
This work has been supported by RAMONES, funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme, under grant agreement No 101017808. The work of P. Batista, D. Cabecinhas, L. Sebastião, and A. Pascoal was partly funded by the by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) through LARSyS—FCT Project UIDB/50009/2020.

REFERENCES

Batista, P., Silvestre, C., and Oliveira, P. Optimal position and velocity navigation filters for autonomous vehicles. Automatica, vol. 46, no. 4, pp. 767-774, April 2010.

Batista, P., Silvestre, C., and Oliveira, P. Single range aided navigation and source localization: observability and filter design. Systems & Control Letters, vol. 60, no. 8, pp. 665-673, August 2011.

Batista, P., Silvestre, C., and Oliveira, P. Sensor-based Long Baseline Navigation: observability analysis and filter design. Asian Journal of Control, vol. 16, no. 4, pp. 974-994, July 2014.

Cichella, V., Kaminer, I., Walton, C., Hovakymian, N., Pascoal, A. Optimal Multi-Vehicle Motion Planning using Bernstein Approximants. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 66, no. 4, pp. 1453 – 1467, April 2021.

Häusler, A., Saccon, A., Aguiar, A. P. , Hauser, J., and Pascoal, A. Energy-optimal motion planning for multiple robotic vehicles with collision avoidance. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 24, no. 3, pp. 867-883, May 2016.

Hung, N., Pascoal, A., and Johansen, T. Cooperative Path Following of Constrained Autonomous Vehicles with Model Predictive Control and Event Triggered Communications. International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 30, no. 7, pp. 2644-2670, February 2020.

Kaminer, I., Pascoal, A., Xargay, E., Hovakimyan, N., Cichella, C., and Dobrokhodov, C. Time-Critical Cooperative Control of Autonomous Air Vehicles, Elsevier-Butterworth-Heinemann, August 2017.

Morgado, M., Batista, P., Oliveira, P. and Silvestre, C. Position USBL/DVL sensor-based navigation filter in the presence of unknown ocean currents. Automatica, vol. 47, no. 12, pp. 2604-2614, December 2011.

Morgado, M., Batista, P., Oliveira, P., and Silvestre, C. Attitude Estimation for Intervention-AUVs working in Tandem with Autonomous Surface Crafts. European Journal of Control, vol. 18, no. 5, pp. 485-495, September-October 2012.

Rego, F., Hung, N., Jones, C., Pascoal, A., and A. Aguiar. Cooperative Path Following Control with Logic-Based Communications: Theory and Practice. Navigation and Control of Autonomous Marine Vehicles, IET, London, UK, Editors Sanjay Sharma and Bidyadhar Subudhi, 2019.

Simetti, E., Indiveri, G., and Pascoal, A. WiMUST: A Cooperative Marine Robotic System for Autonomous Geotechnical Surveys. Journal of Field Robotics, vol. 38, no. 2, pp. 268-288, 2020.

Vasconcelos J., Cardeira, B, Silvestre, C., Oliveira, P., and P. Batista (2011). Discrete-Time Complementary Filters for Attitude and Position Estimation: Design, Analysis and Experimental Validation. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 19, no. 1, pp. 181-198, January 2011.

Viegas, D., Batista, P., Oliveira, P. and Silvestre, C. Position and Velocity Filters for ASC/I-AUV Tandems based on Single Range Measurements. Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 74, no. 3-4, pp. 745-768, June 2014.

Viegas, D., Batista, P., Oliveira, P., and Silvestre, C. Decentralized state observers for range-based position and velocity estimation in acyclic formations with fixed topologies. International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 26, no. 5, pp. 963-994, March 2016.

Vasconcelos J., Cardeira, B, Silvestre, C., Oliveira, P., and P. Batista (2011). Discrete-Time Complementary Filters for Attitude and Position Estimation: Design, Analysis and Experimental Validation. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 19, no. 1, pp. 181-198, January 2011.

The EU project BlueRoSES – Blue Robotics for Sustainable Eco-friendly Services

D. Cabecinhas (1), L. Sebastião (1), A. Pascoal (1), M. Caccia (2)

(1) Institute for Systems and Robotics, Laboratory for Robotics and Engineering Systems, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. dcabecinhas@isr.tecnico.ulisboa.pt.

(2) Institute of Marine Engineering, National Research Council, Genova, Italy.

Abstract: Blue RoSES aims at developing innovative services that seek to adapt marinas and leisure boat design to changing customer demand. It is envisioned that new job opportunities and business models will result from the exploitation of state-of-the-art technologies in marine robotics and ICT. The unifying concept of BlueRoSES is to enable the general public to access and explore underwater sites by piloting Remotely Operated Vehicles (ROVs) from a leisure boat, ground control room or remote web app. The ROVs will also be used to monitor water quality, the seabed and yacht hulls for safer refitting and dismantling. This communication details the software and hardware architecture, as well as technologies, used to allow the safe networked remote operation of the ROVs, as well as suitable user-friendly apps for robot piloting, and an IoT middleware supporting their integration with communication networks. The paper concludes with results from a representative mission at sea.
Key words: Remotely Operated Vehicle, Marine Robotics, Marine Services.

1. INTRODUCTION

In a worldwide context where the blue economy is already significant and has huge potential for future increase, the Blue Growth strategy aims at removing obstacles to further growth through sectoral and cross-sectoral initiatives in knowledge and research, skills, removal of regulatory and policy obstacles, financing, and global level playing field. Based on the notion that maritime economic activities cannot be sufficiently captured through a sectoral approach, the Blue Growth rationale focuses on maritime functions: it promotes actions to increase knowledge needed to foster business innovation and inform policy makers, and to create a business-friendly regulatory and policy environment through a more strategic transnational cooperation supported by EU sea-basin strategies and initiatives. Blue growth is a priority in the Smart Specialization Strategy of over 50 EU regions, focusing on several business areas, namely manufacturing and tourism. One of its principal objectives is the support of coastal and maritime tourism through the design of innovative technologies, leading to increased and sustainable economic growth.

The BlueRoSES project builds on previous Projects such as FP7 CADDY (Cognitive autonomous diving buddy) (Mišković et al., 2015), FP7 MORPH (Marine Robotic System of Self-Organizing, Logically Linked Physical Nodes) (Kalwa et al., 2015) and H2020 WiMUST (Widely scalable Mobile Underwater Sonar Technology) (Simetti et al., 2020), which fomented the development of cooperative marine robotics technologies, and FP7 SaMMY (Smart Application for the Management of Yachting Marinas), H2020 MAG SaMMY (Market Acceleration programme for SaMMY Platform), H2020 Neptune MaSSY (Mobile collAborative Systems for the improvement of Services and business development in Yachting industry) supported, in the area of Smart Solutions for Marinas, the delivery of new improved services for the yachters and marina admins. Leveraging the competencies acquired in these previous projects, the consortium engages the European Commission's Goals for Research and Innovation Policy (2015) of encouraging transfer of knowledge between technology developers and stakeholders, user-centric approaches to all the IT and IoT systems and services.

BlueRoSES aims to developing innovative services that seek to adapt marinas and leisure boat design to changing customer demand. By integrating robotics and IoT, these new services result in creating job opportunities and new business models. Customers are enabled to visit underwater sites by piloting a Remotely Operated Vehicle (ROV) from a leisure boat, ground control room or web app. This facilitates access to the subsea environment by the elderly and young people alike, thus adding a "new dimension" to marinas and attracting increasing interest from diversified users. The project thus fosters the design of innovative leisure boats that integrate robotic vehicles with ever-improving ICT services. The project also addresses environmental challenges since the ROVs can be used to monitor water, seabeds and yacht hulls for safer refitting and dismantling.

2. BLUEROSES CONCEPT

BlueRoSES aims at exploiting state-of-the-art technology in marine robotics (networked control of Remotely Operated Vehicles - ROVs) and ICT (IoT

middleware for sensor networks, smart apps) to develop innovative services for marinas and leisure boats in order to adapt to changing demands from users and address environmental challenges. Figure 1 depicts the seminal idea behind the BlueRoSES project, where current technology is exploited to facilitate remote access to fragile underwater sites of naturalistic or cultural interest. Anyone onboard leisure boats, in control rooms inside marinas or through Internet connection worldwide will be able to do so. To achieve this goal we design, develop and integrate an architecture for networked remote control of underwater robots, as well as suitable user-friendly apps for robot piloting from PCs, smart phones, tablets, etc., and an IoT middleware supporting their integration with communication networks onboard leisure boats and in marinas.

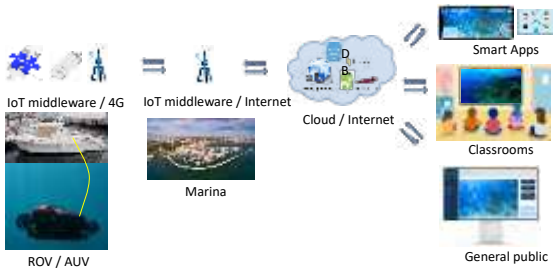


Fig. 1. BlueRoSES concept.

Given this technology, robotics and ICT researchers will endeavour to yield a whole range of results:

- enabling visitors to "stroll" through an underwater archaeologic museum or a pristine marine habitat from their house, leisure boat cabin, or hotel room inside a marina;
- fitting marinas with robotic tools for automatic monitoring of water quality and pollution, providing open, immediate access to measured geo-physical-chemical parameters as well as acquired images of the seabed status;
- hiring leisure boats equipped with robotic tools for remote visit of underwater sites and/or inspection of hull conditions

3. SYSTEM ARCHITECTURE

The general project concept, as summarized in Figure 1, includes *i)* an underwater ROV/AUV hybrid deployed from a ship or marina; *ii)* connected to shore or the global internet via a 4G/LTE cellular connection using an IoT middleware; *iii)* a secure cloud architecture enabling users to connect to the IoT middleware, receive the video-feed and telemetry, and issue commands, regardless of their physical location.

This communication focuses on the first of these elements, the deployment of ROV/AUVs and accompanying software stack, that allows for remote, high-level vehicle operation (triggering of a set of operating modes "protected" by on-board safety features) as well as visualization of data acquired on-line by the robots (vision and acoustics-based), together with telemetry data.

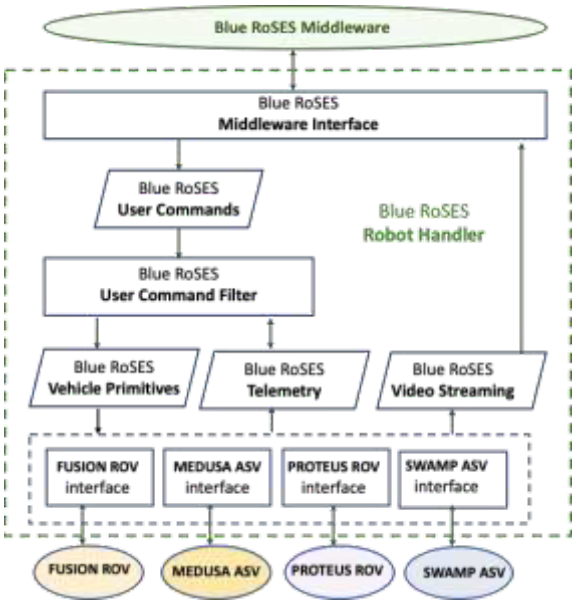


Fig. 2. Block diagram for the BlueRoSES Robot Handler and its connection to the marine Vehicles and Middleware.

The workflow for BlueRoSES operations is depicted in Fig. 2, corresponding to the left-most section of Fig. 1. It comprises a remote operator, possibly without previous ROV operation experience, issuing commands through the use of a smartphone app, with the commands passing through an unreliable communications channel (the internet), where delays and packet losses can occur, before reaching the wired communications network at the deployment boat, which serves as a launching station for the ROV and communicates with it while submerged via an umbilical cable.

For the middleware layer, a publish/subscribe messaging transport mechanism was identified as the right technical solution for sharing commands and telemetry data. In particular, the machine-to-machine (M2M)/"Internet of Things" connectivity protocol MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) has been adopted. This protocol was designed with the particular requirements of IoT devices in mind and is extremely lightweight, ideal for connecting remote devices with a small code footprint, minimal network bandwidth, high-latency or unreliable networks.

Considering the unreliable nature of the communications channel, a "Robot Handler" software is designed to stabilize the communication from the commanding operator so that the vehicle operates always smoothly (i.e., does not follow jittery commands arising from possible delays) and a safe operating mode is enabled, according to the quality parameters of the internet (typically 4G) connection. It's inner working and interaction between the

internal modules will be presented in more detail later in this section.

The development of the Robot Handler software and its communication with the vehicles uses the open-source Robot Operating System (ROS) middleware – a collection of software frameworks (tools, libraries, and conventions) for writing robot software across a wide variety of robotic platforms. The Robot Handler itself is designed to run on a Single Board Computer (SBC) equipped with the Ubuntu 20.04 Linux OS. The consortium coded the Robot Handler in the C++ language and followed standard ROS practices and a node structure to promote interoperability and compatibility. This runtime environment combination resulted in a performant and lightweight software which, not only runs on Ubuntu 20.04 and ROS Noetic but is still compatible with legacy, but still prevalent, hardware and software combinations such as Ubuntu 18.04 and ROS Melodic and even older versions such as Ubuntu 16.04 and ROS Kinetic. The vehicles can be commanded in a variety of motion primitives, namely velocity or position control, heave velocity, altitude or depth, combined with yaw or yaw rate control.

The Robot Handler itself, see Fig. 2, can be divided logically in modules, corresponding to i) MQTT middleware interface, ii) network stabilization, iii) vehicle safety, and iv) vehicle interface, with ii) and iii) implemented in the "User Command Filter" block. This modular approach maps neatly onto the ROS's architecture of nodes and message passing. The implemented Robot Handle is thus composed of 4 ROS nodes, as depicted in Fig. 3, corresponding to the outlined Robot Handler modules.

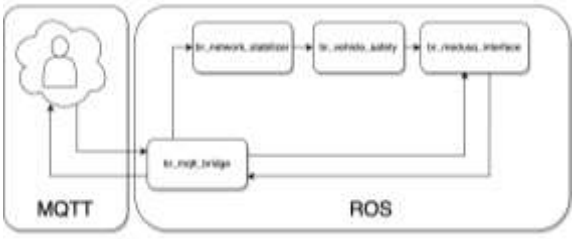


Fig. 3. Diagram of the Robot Handler ROS nodes.

The node `br_mqtt_bridge` receives MQTT messages from the middleware and converts them to ROS messages, and *vice versa* for the telemetry data. It is thus a *bridge* between the MQTT middleware and the ROS system used for vehicle control. The Network Stabilizer node implements a state machine for the operative mode of the ROV. The main goal is to detect abnormal network conditions and react by modifying the operative mode of the ROV to a less demanding one in terms of reference updates. As an example, if the network delay is longer than a few tenths of a second it becomes very hard to command the ROV via direct velocity commands as there is a mismatch between the images and telemetry being seen by the remote operator and what the vehicle is actually doing. In the limit, with an unaware operator, the delays can lead to instability and a strong overreaction in commands issued. The solution to this destabilizing positive feedback loop taken in this Project was to downgrade the working mode from *velocity control* to *position control* while the network instability endures.

The final safety feature of the Robot Handler is the enforcing of strict safety volumes where the ROV is allowed to operate and strict safety distances from the ROV to obstacles, including the sea bottom. Safety volumes are defined in a *yaml configuration file* appropriate for data serialization and sharing. The volumes can be defined as rectangular prisms by providing the coordinates of their corners or as vertical cylinders by providing a radius and the center location. Maximum depth and minimum altitude to be maintained can also be specified. Locations of known obstacles and the minimum distance the ROV should maintain from them can also be specified as rectangular prisms or cylinders.

The final Robot Handler component node is charged with converting standard BlueRoSES reference messages, ensured to be safe by the network and vehicle safe modules, to appropriate commands accepted by the actual vehicles; and to convert the telemetry data in the vehicle message format to the standard BlueRoSES telemetry message. For this project interfaces with four AUV and ASV vehicles were coded, namely IST's Medusa class of vehicles (Abreu et al., 2016) and BlueROV 2 (which was adapted to run on the same software stack as the Medusa vehicles), and CNR's Proteus (Bruzzone et al., 2000) and Swamp vehicles.

4. EXPERIMENTAL RESULTS

The *Ocean Revival Underwater Park*, situated off the coastal town of Portimão, Portugal, was chosen as the first test site for the BlueRoses project for its easy access to the site by local support boats and potential in terms of affording users remote access to fascinating underwater sites from the comfort of land locations. The site consists of four ex-Portuguese Navy vessels that were deliberately sunk in the same place and form the largest single artificial reef structure in the world with the ideal conditions for the proliferation of marine life. It is at 26-32 meters bathymetric and is located 2 miles from the coast and 3.3 miles from the bar of the village of Portimão, where a good 4G/LTE cellphone internet connection is possible.

The underwater vehicle employed was a BlueROV 2 in a Heavy Configuration, see Fig. 4, with 8 total thrusters (four vertical thrusters and four thrusters along the horizontal plane) enabling 6 degree-of-freedom control. The ROV was equipped with a Pixhawk microcontroller, a Waterlink A50 DVL and a High Definition 1080p camera. Several dives were performed in the vincinity of the Frigate Ex-NRP

Hermenegildo Capelo F481, one of the sunken vessels at *Ocean Revival Park*.

Remote partners at CNR-INM, Italy and IST, Portugal demonstrated successfully the remote-control capabilities of the overall system proposed in BlueRoses. Several dives were undertaken where the underwater robot was piloted from remote locations from the internet, namely Lisbon, Portugal and Genova, Italy. The remote pilots, controlling the vehicle by issuing velocity commands, were able to successfully explore the sunken ship, observing features such as the ship's wheel (Fig. 5), bridge, artillery gun (Fig. 6), bow (Fig. 7), among many others, as well as entering inner galleries and rooms.

Throughout the field tests, a live video-feed of the camera onboard the vehicle was made available to the general public, in addition to the video and telemetry links for the remote pilots, Fig. 6, making it possible for the public to follow the trials without interfering with the missions.

The sea trials brought the vision of the BlueRoSES project to life, proving the validity of the proposed integrated solutions for robotics and IoT for remote operation of underwater ROVs, and successfully immersing the pilots and the spectating public in the usually inaccessible underwater environment.



Fig. 4. BlueROV 2 underwater vehicle employed in the field tests.

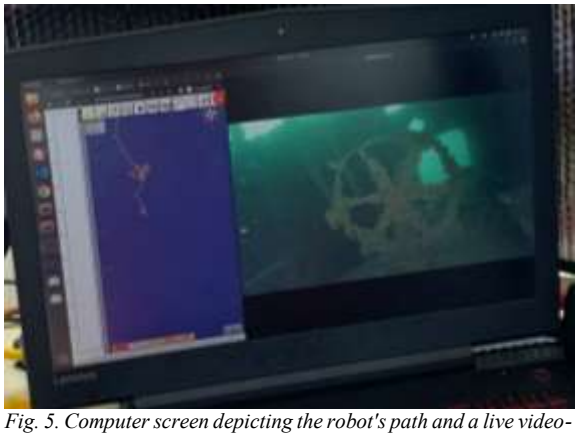


Fig. 5. Computer screen depicting the robot's path and a live video-feed showing in detail the sunken ship's wheel.



Fig. 6. Remove pilot in Genova, Italy, commanding the underwater ROV in Portimão, Portugal. The live-video shows a detail of the sunken ship's artillery gun.



Fig. 7. Detail captured in video of the sunken ship's bow.

Acknowledgements

This work has been supported by BlueRoSES, co-funded by the European Maritime and Fisheries Fund under the Grant Agreement No. 863619. The work of P. Batista, D. Cabecinhas, L. Sebastião, and A. Pascoal was partly funded by the by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) through LARSyS—FCT Project UIDB/50009/2020.

REFERENCES

Abreu, P. C., *et al*. (2016). The MEDUSA class of autonomous marine vehicles and their role in EU projects. *OCEANS 2016 - Shanghai*, pp. 1-10J.

Bruzzone, G., et al. (2020). Monitoring of Sea-Ice-Atmosphere Interface in the Proximity of Arctic Tidewater Glaciers: The Contribution of Marine Robotics. Remote Sensing 12, no. 11, 1707.

Kalwa, et al. (2015). EU project MORPH: Current Status After 3 Years of Cooperation Under and Above Water. IFAC-PapersOnLine, v. 48, n. 2, pp. 119-124.

Mišković, N., et al. (2015). Overview of the FP7 project "CADDY — Cognitive Autonomous Diving Buddy", OCEANS 2015 - Genova, pp. 1-5.

Simetti, E., et al. (2020). WiMUST: A cooperative marine robotic system for autonomous geotechnical surveys. J Field Robotics, 38, 268–288.

Generation WAVY: a New Breed of Surface Drifters for all Ocean Domains

A.Silva (1), A. Sousa(2), F. Pedrera (3), J. del Rio (4), J.P. Pinto (5), M. Oliveira (6), P.Gonçalves (7), P. de Saint Léger(8), R. Chumbinho (9)

(1) Deimos Engenharia, silva.antonio@deimos.com.pt
(2) OceanScan Marine Systems & Technology
(3) Deimos Space
(4) Universitat Politècnica de Catalunya
(5) Instituto Hidrográfico
(6) Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência
(7) Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática – University of Porto
(8) Collecte Localisation Satellites
(9) BlueWise Marine

Abstract: A new family of multi-purpose, multi-sensor, small sized, easy-to-handle, low-cost, spherical surface drifters is about to appear in the market, with its first three models. The *WAVY* Ocean is a current, wave and near-surface temperature gradient tracker for the open Ocean; the *WAVY* Littoral is a current and wave tracker designed for nearshore operations; and the *WAVY* Basic is a current and near-surface temperature tracker intended for riverine and estuarine environments, and suitable for citizen science. The *WAVY* optimized buoyancy - only 30% of the axes above the surface - ensures that their displacement is essentially due to the current, while their small size makes them sensitive to the average vectors in the very near surface. Examples of *WAVY* Ocean full resolution data from recent observations illustrate the performance and the potential of these drifters in operational missions requiring near-real time data of the very near surface of the ocean.

Keywords: current tracking, ocean surface, surface drifters, temperature gradient, wave tracking

1. INTRODUCTION

Surface drifters have been extensively used to map ocean currents, follow oil spills and marine debris or aid search and rescue operations. Depending on the application, they have taken different configurations and sizes, but for most purposes the major concern of drifter's developers was how to reduce the effect of direct wind and wave forcing.

For the mapping of average currents in the surface layer (upper 10-100 m), the solution has been to tether a drogue to a surface buoy in such a way that the drogue was placed at the core of the layer being tracked. The first successful drifter of this kind used a holey sock drogue with a cross-sectional area 40 times larger than the cross-sectional area of all other components (Lumpkin, Özgökmen and Centurioni, 2017). Such conception has been adopted by NOAA's Global Drifter Program (GDP). The drifter itself remained an equatorially buoyant sphere that became quite useless when the drogue was lost.

Very popular in near surface studies was a drifter developed by Russ E. Davis: a 1 m long central vertical tube containing a satellite transmitter, antenna and batteries, with four vanes attached to 50 cm long arms forming a cruciform drogue (Davis et al. 1982, Davis 1985). Stokes drift and direct wind forcing were minimized while measuring current in roughly the upper metre of the Ocean. Due to the bulkiness and fragility of the Davies drifter, an evolution of its conception is the Carthe drifter (http://carthe.org/) developed for the Lagrangian Submesoscale Experiment.

Whether drogued or undrogued, most surface drifters on the market tend to be spherical or otherwise shaped, floating equatorially. Although this poses no problem when attempting to track waves, this type of buoyancy allows direct drifter exposure to the wind. This is a major inconvenient when attempting current tracking, even when the current is wind induced. On the other hand, the sensitivity to Stokes drift may be an asset when attempting to follow an oil spill or the spreading of plastic debris. The H2020 Project MELOA (https://ec-meloa.eu) used the *WAVY* drifter concept introduced by the RAIA Coastal Observatory (www.marnaraia.com) to further develop a family of small-size, sturdy, easy-to-handle, cost-effective, multi-purpose surface drifters.

2. THE *WAVY* DRIFTERS

The original *WAVY* was a 12 cm-diameter, 750 g sphere containing a payload of a GPS receiver and antenna, a microprocessor, Bluetooth module and GPRS module and antenna. Two perfectly adjusted semi-sphere caps of polyurethane resin protected the electronics from impacts, and a Clear Flex® layer completely sealed off the system (Jorge da Silva et

al., 2016). Magnetic switches were used to start/stop data acquisition and data download upon recovery of the drifter. GPS sampling frequencies were possible up to 1 Hz. Positions were stored in a logger and could be displayed in near-real time through a viewer.

This drifter was intended to estimate the current in the upper 10 cm of the littoral ocean, i.e., the shoaling, breaking and swash zones. If going aground with a wave, its spherical shape would favour the return to water with the next wave. The buoyancy was optimized in such a way that the drifter was submerged just enough to reduce wind drag effect while allowing the GPS antenna to stay above water. The mass was also distributed in a way that would reduce the amplitude of high frequency oscillations and, most of all, prevent capsizing. This was understood to have been achieved, as revealed by the very high acquisition rate of GPS positions at 1H, even in the wave breaking zone.

Project MELOA added two members to the *WAVY* family - one for open ocean operations (*WAVY* Ocean) and another for inshore and estuarine waters (*WAVY* Basic) – and gave the original one (*WAVY* Littoral) the capacity to acquire wave data in the littoral area (Table I). The main characteristics of the original *WAVY* were kept, namely the spherical shape, no more than 30% height exposure above the water surface and no components out of the sphere.

Table. I. WAVY family new members and possible uses.

***WAVY* version**	**Main Features**	**Endurance/Acquisition Rate**	**Possible uses**
WAVY Ocean	20cm, 3450g, solar panels, ARGOS sat-coms, GNSS, IMU, 2 thermistors (SST + grad-SST), directional waves	Temperatures: 20 min (nominal) Waves (4096 4Hz-bursts) at 1,2,3,5 h Optional: no waves Endurance: ca. 90 days at 1 h wave obs ca. 140 days at 3 h wave obs	Coastal, shelf and deep-sea, long-lived missions Lagrangian current measurements Ground-truth for satellite-derived SST Near surface temperature gradients Numerical models feeding
WAVY Littoral	12 cm, 770g, GPRS-coms, GNSS, IMU, directional waves	36 h at 4Hz continuous	Exposed littoral areas, short-lived missions Wave & current measurements in nearshore areas Safety in public beaches Littoral and nearshore dynamics
WAVY Basic	10cm, 400g, GPRS-coms, GNSS, 1 thermistor (SST)	24 h at1Hz continuous	Estuarine & sheltered areas, short-lived missions, Citizen science

The performance of the *WAVY* Ocean and the *WAVY* Littoral as wave tracking devices faced a serious challenge. Possible non-linear interactions in the very high-frequency domain, close to the natural frequency of the drifters, gave rise to a spurious energy band in the low-frequency side of the wave spectrum. As this band was still situated within the surface waves domain, it was not possible to digitally filter it. The adopted solution was the addition of an equatorial ring to the drifters, protruding 3 cm out of the WAVY Ocean and 2 cm out of the *WAVY* Littoral, to damp the high frequency oscillations. No such addition was necessary on the WAVY Basic, as this drifter does not have wave measurement capacity. Although it was no longer possible to fulfil the requirement of having no protruding parts (Figure 1), the rings did not interfere with the current tracking efficiency of the drifters. Work is, nevertheless, underway to robustly find the minimum ring size that, while optimizing the drifters' performance, does neither significantly reduce their spherical elegance nor introduce major packaging difficulties.



Figure. 1. WAVY drifters (proportions not respected): WAVY Ocean (top left), WAVY Littoral (bottom left), WAVY Basic (top right; detail of thermistor at bottom right). Notice, in the WAVY Ocean, the two thermistors (inside screws), the solar panels (above the ring) and the ARGOS sat-com antenna. When adrift, the base of the antenna approximately coincides with the water surface.

3. THE *WAVY* OCEAN DRIFTER

Clearly the most ambitious member of the family, the *WAVY* Ocean sits at the core of Project MELOA. It aims to occupy a place of its own in a market where a large number of drifters is being offered although none with its characteristics. It was purposely intended not to be biodegradable, to avoid polluting the Ocean with its payload components, and under the expectation that all units will eventually be recovered or end up at a beach or other coastline. This would be the very long-term target and, for that purpose, MELOA worked on prototypes of energy harvesting devices. In the meantime, one needs to rely on a (small) number of battery cells to power all elements of the drifter.

Another target was to use European systems, both for geolocation and communications. The geolocation module on board the *WAVY* Ocean is compatible with all positioning constellations, including Galileo. ARGOS system, initially operated by CLS and presently by Kinéis (a CLS group company) was chosen for satellite communications, and a dedicated antenna has been developed from scratch by CLS to fit inside the encapsulation. The communications module is already prepared for ARGOS 4, and is ready to accept (with minor modifications) the new Kinéis system as soon as it becomes available. Unfortunately, as a consequence of the Covid-19 pandemic, that imposed drastic delays in the launch of new satellites, MELOA had to rely on ARGOS 3, with a low number of satellites and long time intervals with no passes. CLS devised a way to minimize the number of message losses, but this was done at the cost of data resolution (in position coordinates, temperature values and derived wave parameters). If it were not for the few drifters that went aground, it would not have been possible to determine the real performance of the *WAVY* Ocean as a sea-surface observation device.

Indeed, the MELOA consortium was fortunate to have been invited to participate in the CALYPSO22 exercise that took place in the Balearic Sea in February-March 2022, under the coordination of the NATO Centre for Maritime Research and Experimentation (CMRE), in La Spezia, Italy. What follows is totally based on the results of the CALYPSO22 exercise.

Table II. CALYPSO22 - valid WAVY Ocean drifting time span

WO#	Validated start	Validated end
61	04 MAR 2022, 09:49	16 MAR 2022, 05:29
68	25 FEB 2022, 10:37	21 MAR 2022, 09:59
76	04 MAR 2022, 10:11	22 MAR 2022, 16:51
78	01 MAR 2022, 10:01	24 MAR 2022, 15:21
79	01 MAR 2022, 11:22	25 MAR 2022, 05:22
82	01 MAR 2022, 12:03	18 MAR 2022, 11:23
83	04 MAR 2022, 10:32	16 MAR 2022, 13:32
84(a)	25 FEB 2022, 10:56	20 MAR 2022, 19:35

(a) not recovered

Eight *WAVY* Ocean drifters were deployed between 25 February and 4 March, all of them ending up in the Spanish coast of the Mediterranean by 25 March (Table 2). Seven drifters were collected and returned to Universitat Politècnica de Catalunya, a member of the MELOA consortium. The drifters were set up to acquire temperature at 20 minutes intervals and waves data every hour. The valid drifting start time of each drifter was set based on the reports of time of deployment and the observed change of temperature value upon immersion. The valid end time for drifting was offset based on location, sometimes complemented by the occurrence of anomalous wave heights, as a result of grounding.

Table III. Success rate of internal data acquisition and after satellite transmission

WO#	Internal Logging				Received after satellite transmission			
	Theoretical no data points	Theoretical no wave data points	No. GPS logging failures	No. identified outliers	Total no. data points	%	Total no. wave data points	%
61	852	284			761	89.3	164	57.7
68	1727	576	2	1 GNSS, 1 (T1+T2)	1553	89.9	331	57.5
76	1317	439			1233	93.6	289	65.8
78	1673	557		1 GNSS	1536	91.8	356	63.9
79	1711	570			1574	92.0	365	64.0
82	1223	407			1118	91.4	232	57.0
83	874	291	1		840	96.1	194	66.7
84	1683	561			1605	95.4	361	64.3

The number of theoretical data points was calculated for each drifter and compared with the corresponding number of data points in the drifters' internal logs as well as with the data points arriving via ARGOS. The same procedure was done for the waves data points only. Only two drifters showed less than 100% data position logging success: *WAVY* Ocean 83 and 68, respectively, with 1 and 2 failures (Table 3). These results are in line with those reported by Jorge da Silva et al. (2016) for the original *WAVY*, now upgraded to *WAVY* Littoral. On the other hand, three evident outliers were identified: 2 in *WAVY* Ocean 68 (GNSS and temperature) and 1 in *WAVY* Ocean 78 (GNSS). A different picture is revealed by the data returned via ARGOS, with an average success of 92.4% for temperature data, but only 62.2% for waves data. The reason for this difference probably resides in the strategy used to reduce data loss. While a message is built every 20 minutes with temperature data from the actual and the previous 3 temperature data readings, no similar strategy was adopted for waves data.

An inspection of the time series of the physical variables derived from the internally logged data values may be looked upon as a preliminary assessment of the drifters' performance. The current velocities estimated from the (unfiltered) positions observed at 20 minutes intervals reveal values generally within 50 cm/s until 12 March (Figure 2).

During this time interval the wave heights were generally below 1.5 m, decreasing to 0.5 m with peak periods decreasing from 8 s to about 4 s. The current velocity and the wave minima occurred in 9-10 March when a longer swell from SW became apparent. After 12 March an easterly storm structured

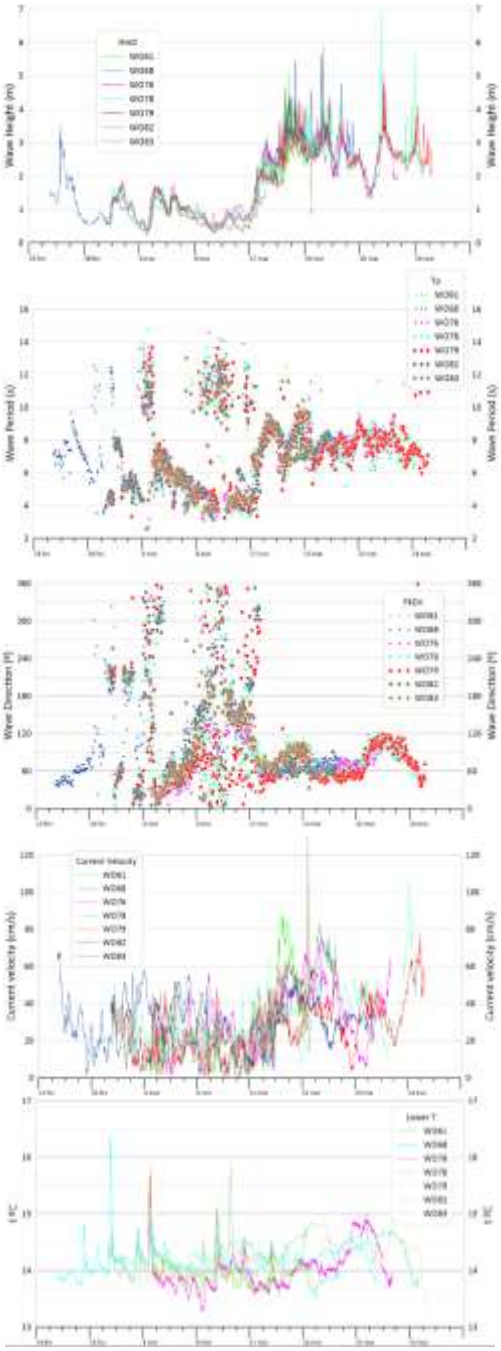


Figure. 2. Time series of observed and derived variables from internally logged data (from top to bottom): significant wave height, wave peak period, wave peak direction, temperature at WAVY bottom and current velocity.

the wave field around 7-9 s NE-SE, with the wave height increasing to 3-4 m. The undrogued drifters may have been carried in the direction of the waves by the breaking crests, at nearly the speed of the wave crest, hence the apparent increase in the current velocity to 40-60 cm/s. By 20 March, after the storm, a current minimum was apparent in association with a relative minimum in the wave height and a maximum in the temperature. The WAVYs did reveal the wind and wave induced dynamics typical of the near-surface of the ocean. The apparent wave height and current outliers in WO 83 on 16 March result from a validation process where nearshore wave breaking was understood to have occurred.

4. FINAL REMARKS

The results obtained during the CALYPSO exercise are quite encouraging, suggesting that the *WAVY* Ocean is an adequate drifter to track the wind and wave induced current dynamics in near-surface of the Ocean, a capacity that is not exhibited, or has been purposely avoided, by other drifters. This capacity may be invaluable in the tracking of oil spills or plastics in the Ocean. Further analysis of the performance of the thermistor pair in the characterization of the near-surface temperature gradient (not analysed in this contribution) is still necessary.

Acknowledgements

Thanks are due to Dr. Pierre-Marie Poulain for the kind invitation to participate with *WAVY* Ocean drifters in the CALYPSO 22 exercise.

The authors are also indebted to the anonymous citizens that recovered the drifters that went aground, as well as to the Spanish authorities for all the help in the drifters' return.

The contribution of Reviewer 2 to the improvement of the text was also highly appreciated.

This is a contribution to Project MELOA (Multi-purpose/Multi-sensor Extra Light Oceanography Apparatus - H2020-SC5-2017-OneStageB). This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 776825.

REFERENCES

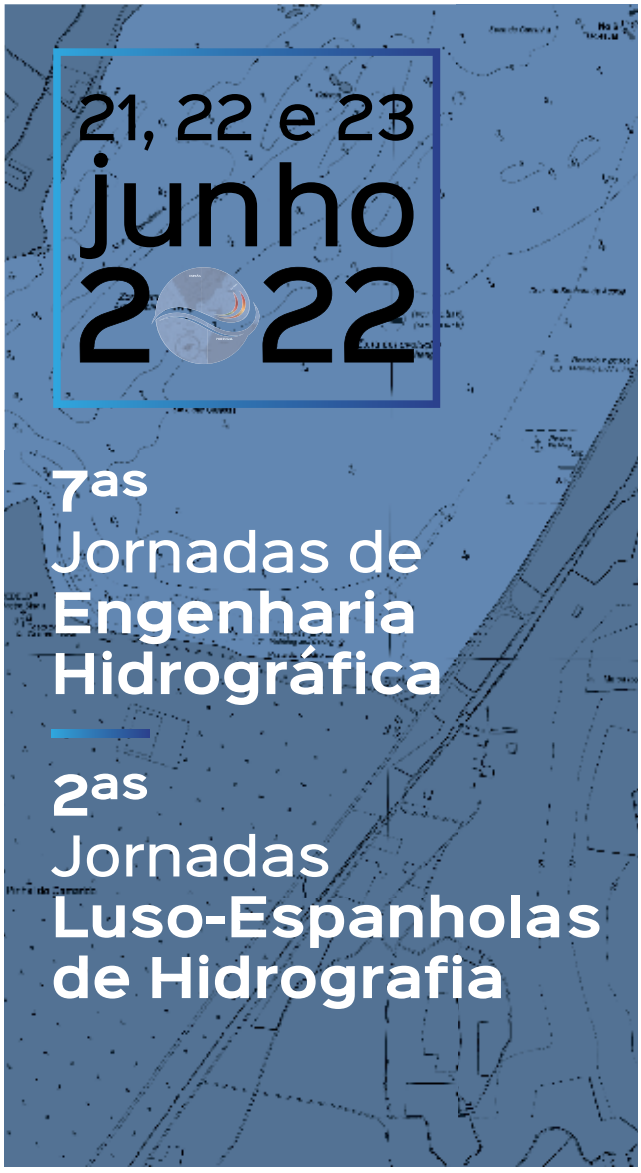
Davis, R.E. (1985) Drifter observations of coastal surface currents during CODE: the method and descriptive view. *Journal of Geophysical Research*, 90:4741–55.

Davis R.E., J.E. Dufour, G.J. Parks and M.R. Perkins (1982) Two inexpensive current-following drifters. Ref. 82–28, Scripps Institute of Oceanography, La Jolla, California

Jorge da Silva, A., D. Mendes, J. Pinto, B. Loureiro, M. Oliveira and A. Rocha (2016) Observation of near-shore circulation with Lagrangian drifters developed by the RAIA coastal observatory. 4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Instituto Hidrográfico, Lisboa, 455-458.

Lumpkin R., T. Özgökmen and L. Centurioni (2017) Advances in the Application of Surface Drifters. *Annual Reviews of Marine Science,* 2017 9:59–8

INFRAESTRUTURAS DE DADOS GEOESPACIAIS DO MAR



Planos de gestão de dados… um *must*!

S. Almeida (1), M. Alves (1), P. Nunes (1)

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

Resumo: Na década dos oceanos, o apoio à realização de estudos climatológicos ou ambientais exige a manipulação de grande volume de dados e de diferentes tipologias. Para tal, é necessário que os mesmos estejam organizados e acessíveis, o que só é possível se existir uma gestão de dados cumprindo os requisitos das boas práticas. Não sendo um objetivo *per si*, esta correta gestão conduz à melhoria do conhecimento e à subsequente integração e reutilização de dados. Como contribuição para essa gestão de qualidade, as entidades financiadoras passaram a exigir a apresentação dos planos de gestão de dados. Este artigo descreve o que são os Planos de Gestão de Dados, quais as orientações nacionais e internacionais sobre os mesmos e quais as ferramentas disponíveis para a sua elaboração. O estudo servirá de base ao desenvolvimento de um Procedimento de Trabalho de apoio aos gestores de projetos de investigação.

Palavras-chave: ciência aberta, gestão de dados, plano de gestão de dados.

1. INTRODUÇÃO

As recomendações da Comissão Europeia têm, nos últimos anos, sido conducentes à definição de políticas que privilegiam o acesso aberto quer a dados quer a informação. Nesse trilho, as exigências das entidades financiadoras de projetos de investigação cumprindo as boas práticas, têm dado maior relevância à componente da gestão e acompanhamento do ciclo de vida dos dados. Como consequência torna-se obrigatório a criação do Plano de Gestão de Dados (PGD) aquando da submissão de um projeto a financiamento.

2. PLANO DE GESTÃO DE DADOS

2.1. O que é?

Segundo o Guia da IOC (UNESCO, 2016) é um documento formal que acompanha o ciclo de vida dos dados. O principal objetivo da sua produção é garantir o cumprimento dos requisitos FAIR (Wilkinson *et al.*, 2016), ou seja, o assegurar que a aquisição é devidamente realizada, que os dados estão documentados, acessíveis e que são preservados ao longo do tempo, permitindo assim a sua reutilização em investigações vindouras.

O fundamental dos princípios FAIR (***F**indable, **A**cessible, **I**nteroperable and **R**eusable*), como resumido na figura 1, consegue atingir-se respeitando alguns pontos chave como, por exemplo, criando identificadores únicos, utilizando padrões e vocabulários controlados.

Ao elaborar um plano de gestão de dados, existem um conjunto de questões, como apresentado na figura 2, que devem ficar esclarecidas naquele documento. Os dados que vão ser recolhidos no âmbito do projeto, quer novos quer existentes, quais as metodologias e a organização adotada, que formatos irão ser utilizados, onde ficarão a residir dados e metadados, que salvaguardas e medidas de proteção serão implementadas, quais os códigos éticos e de conduta aplicados e as definições de acesso e preservação.



Fig. 1. Os Princípios FAIR (Couto,2021).



Fig. 2. Plano de gestão de dados.

2.2. Quem é o responsável?

O plano de gestão de dados é da responsabilidade do investigador coordenador do projeto.

2.3. Quando se deve apresentar?

O Plano de Gestão de Dados pretende-se que seja um documento vivo, que em caso de necessidade seja reajustado ou reformulado. Assim, a primeira versão

deve ser apresentada aquando da submissão da candidatura a financiamento ou noutras situações, nos primeiros meses após a aprovação da candidatura. A responsabilidade da definição destes prazos é do organismo financiador.

2.4. Como se produz um PGD?

Existem várias ferramentas que permitem criar o Plano de Gestão de Dados e cada entidade financiadora poderá sugerir a utilização de diferentes aplicações para a sua geração.

Um grupo de investigadores da Universidade do Minho em parceria com a FCT, analisaram alguns dos programas disponíveis e em 2020, publicaram os resultados em Relatório Técnico (Príncipe *et al.*, 2020). Depois de apresentarem várias ferramentas, apresentam uma análise comparativa detalhada de quatro delas, a DMP online, a ARGOS, a DSW e a RDMO, quanto às funcionalidades, requisitos e custos (extrato na Tabela I).

A União Europeia não restringe a tipologia de ferramenta a utilizar estando várias disponíveis, que cumprem igualmente os requisitos, apesar de algumas terem custos associados, sendo algumas de serviço na *cloud* e outras, necessitarem de instalação local.

A FCT fez uma adaptação de modelos existentes e irá disponibilizar um semelhante ao apresentado pela *Science Europe* (Science Europe, 2021). Produzido na *cloud* com a ferramenta ARGOS, tem disponível uma versão em língua portuguesa. Esta aplicação deverá ser utilizada no caso de candidaturas a financiamentos por aquela entidade.

Ao aceder ao link https://argos.openaire.eu/ (figura 3), é visível um botão verde que permite iniciar a criação do PGD. Ao continuar, estão disponíveis vários PGDs públicos, que se podem consultar ou descarregar. A entrada pode ser realizada de 5 modos diferentes: por um utilizador OpenAire, com o identificador ORCID, EUDAT ou através da conta Gmail ou do Twitter.



Fig. 3. Portal do ARGOS.

A produção do PGD passa por diferentes etapas, que se apresentam nos moldes de resposta a um questionário e são sintetizadas no esquema da figura 4, para o caso da aplicação ARGOS. Após preencher os vários campos, finaliza-se o plano salvaguardando a versão atual no formato desejado.

Tab. i. Extrato da comparação de ferramentas (Príncipe et al., 2020).

Aplicações	DMP online	ARGOS	DSW	RDMO
Proprietário	Digital Curation Center (UK)	OpenAIRE (EU)	ELIXIR (CZ e NL)	Deutsche Forschungsgemeinschaft
Open source	sim	sim	sim	sim
Serviços cloud vs local	Disponibiliza os dois	Disponibiliza os dois	Disponibiliza os dois	Disponibiliza os dois
Autenticação	requerida	não necessária	requerida	requerida
Atribuição de DOI	sim	sim	sim	sim
exportação	pdf, doc, xml	pdf, doc, xml, json	pdf, doc, LaTeX, json	xml, docx, odt



Fig. 4. Passos na plataforma ARGOS.

2.5. A Divulgação à comunidade

No Fórum de Gestão de Dados de Investigação tem sido feita divulgação sobre a importância dos Planos de Gestão. Os *Data Talks* sobre o assunto estão disponíveis no portal do Fórum, podendo ser visionados em qualquer momento.

No último evento (8º FORUM GDI) realizado no final de 2021 em Coimbra, também foi organizado um *workshop* sobre a mesma temática. Brevemente será ainda divulgada a realização de uma formação dirigida a investigadores e orientada por Técnicos da FCT/FCCN.

3. CONCLUSÕES

As políticas de ciência aberta são conducentes a uma maior partilha do conhecimento.

A possibilidade de atribuição de DOI ao Plano de Gestão de Dados irá, de certa forma incentivar a criação deste documento, permitindo a sua disponibilização e acessibilidade com a referenciação pretendida. A publicação em formato Json torna os PGDs interpretáveis tanto por humanos como por máquinas.

A aplicação das boas práticas sugere a utilização de identificadores únicos, a padronização dos metadados e a disponibilização pública de resultados permitindo a reutilização pela comunidade científica.

REFERÊNCIAS

Couto, Fabiano (2021) – Plano de Gestão de Dados.https://www.youtube.com/watch?v=D-NjUp77pZ4

Guidelines for a Research Data Management Plan. Paris. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, 16 pp. 2016. (IOC Manuals and Guides, 73) (English.) (IOC/2016/MG/73)©UNESCO 2016

https://forumgdi.rcaap.pt/, em 2022-04-21

Príncipe, P., Moura, P., Vieira, A. e Pereira, F. (2020). Relatório técnico sobre ferramentas para a elaboração de Planos de Gestão de Dados. *http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/67530*

Science Europe (2021). Practical Guide to the International Alignment of Research Data Management, em https://scienceeurope.org/our-priorities/research-data/research-data-management/

Wilkinson, M., Dumontier, M., Aalbersberg, I. *et al.* The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Sci Data 3, 160018 (2016).

https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

https://ec.europa.eu/research/participants/docs/h2020-funding-guide/cross-cutting-issues/open-access-data-management/data-management_en.htm, em 2022-02-28

OpenGovIntelligence project (2017). Deliverable "D6.1 – Data Management Plan". https://ec.europa.eu/futurium/en/content/d61-data-management-plan.html

CoastSat – Figueira da Foz Coastline extraction from Sentinel-2 images

P. Nunes (1), L. Veiga (1), D. Carinhas (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas n.º 49 - Lisboa. antunes.nunes@hidrografico.pt.

Abstract: Nowadays satellite remote sensing is an important low-cost source of data. This source of information combined with tools development effort is decreasing the knowledge barrier between experts and non-expert users. CoastSat is a software toolkit written in Python by Kilian Vos that enables users to obtain time-series of shoreline position using publicly available satellite imagery (Landsat missions and Copernicus-2) stored in Google Earth Engine (GEE). This tool is available on GitHub repository and the process can be extended to all world beaches. Using Remote Sensing combined with image processing techniques make it possible a systematic extraction of shorelines and build time series of shoreline locations. CoastSat tool enables the user to extract shorelines from Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2 images. This article intends to describe how authors use CoastSat to extract a shoreline in the Figueira da Foz beach by running the procedure to retrieve images stored in GEE, running the shoreline detection algorithm to automatically extract the shoreline and apply shoreline position corrections based on beach slope and tidal water levels. The shoreline positioning can be compared with other sources of information: shoreline from nautical charts and data collected by COSMO program from the Portuguese Environment Agency (APA).

Keywords: Google Earth Engine, hydrography, remote sensing, Sentinel-2, shoreline extraction

1. INTRODUCTION

Coasts of the world are dynamic environments with a heavy population density. Beaches and coasts are important resources for their environmental and economic value. Ocean coasts are affected by variations in mean sea level, extreme waves, storm surges and a wide variety of other physical processes. The climate change and sea level rise have significant impacts in coastal zones.

The need to implement a close monitoring strategy to prevent impacts and define adaptation strategies was clearly identified in a study developed by the scientific team from Faculty of Science of University of Lisbon (Antunes *et al*, 2017). *In situ* data gathering is an expensive task and for this reason scientist have been looking for alternative ways for systematically collecting data. European Space Agency (ESA) and other international space agencies have launch missions for environmental monitoring with potential to be a solution for time series of shoreline variations monitoring.

For this study authors used the open source CoastSat (Vos, 2018) python toolkit written and maintained by Kilian Vos (2018) which provide an inexpensive way to obtain 30+year time-series of approximately biweekly shoreline positions with a horizontal accuracy of ~10m at any sandy coastline worldwide (Vos *et al.,* 2019a). CoastSat can retrieve remote sensing images available on Google Earth Engine (GEE) – Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2.

In this study shoreline is defined as the instantaneous interface between water and sand captured at the instant of image acquisition.

On the next sections authors present the results of the CoastSat methodology applied to Figueira da Foz beach, and the comparison between the shoreline extracted and a field survey carried out in September of 2018 made available by COSMO monitoring program (APA, n.d.).

1.1. Study area

The study area – Figueira da Foz - is located on the west Atlantic coast of Portugal (Fig.1) and is delimited by the bounding rectangle defined by the geographic coordinates 8,8928^0 W to 8,8575^0 W and 40,1130^0 N to 40,1667^0 N.

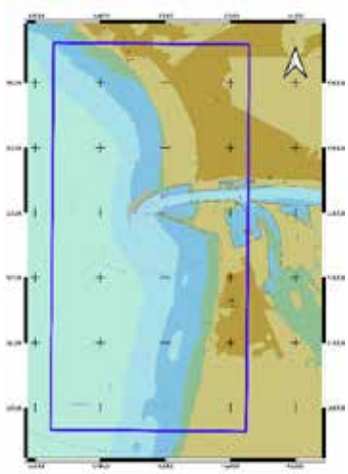


Fig. 1. Study area location

The current study area was chosen because is an expose zone to wave conditions and because the beach at north side of river Mondego have been changed on last decades with a notorious increase of area.

2. DATA SOURCES

The data used in this study are from two sources: the Remote Sensing data from the Sentinel-2 program stored in the GEE and a Digital Elevation Model (DEM) with 30cm of spatial resolution produced by COSMO coastal monitoring program (APA, n.d.).

2.1. Sentinel-2

Sentinel-2 is a high-resolution optical Earth observation mission developed by ESA within the Global Monitoring for Environment and Security (GMES) program. It is a system of two polar-orbiting satellites providing data and applications for operational land monitoring, emergency response and security services (ESA, 2012).

Sentinel-2 is a wide-swath, high-resolution, multi-spectral imaging mission, supporting Copernicus Land Monitoring studies, including the monitoring of vegetation, soil and water cover, as well as observation of inland waterways and coastal areas.

The Sentinel-2 Multispectral Instrument (MSI) sensor samples 13 spectral bands hanging from the Visible (VNIR) and Near Infra-Red (NIR) to the Short Wave Infra-Red (SWIR)

- 4 x 10 meter Bands: the three classical RGB bands ((Blue (~493nm), Green (560nm), and Red (~665nm)) and a Near Infra-Red (~833nm) band;
- 6 x 20 meter Bands: 4 narrow Bands in the VNIR vegetation red edge spectral domain (~704nm, ~740nm, ~783nm and ~865nm) and 2 wider SWIR bands (~1610nm and ~2190nm) for applications such as snow/ice/cloud detection, or vegetation moisture stress assessment;
- 3 x 60 meter Bands mainly focused towards cloud screening and atmospheric correction (~443nm for aerosols and ~945nm for water vapour) and cirrus detection (~1374nm).

CoastSat uses the Google Earth Engine API to retrieve Sentinel-2 (MSI) Level 1-C products (Fig.2), which represent Top-of-Atmosphere (TOA) orthorectified image of reflectances. Each image is supplemented by quality assessment band, pre-computed by ESA, which contains a per-pixel cloud mask (Vos, 2018) (ESA, 2012).



Fig. 2. Sentinel-2 Level-1 data processing chart (ESA, 2012)

2.2. COSMO DEM

The COSMO DEM[1] is the result of merging a Micro DSM collected by Drone with a single beam hydrographic survey (30 meters between survey lines) for depths from -1m to 3m and a multibeam survey for depths greater than 3 m.

The DEM was used to extract the MSL contour line in order to compare with points obtained by remote sensing extraction. DEM elevations are referred to Chart Datum (CD), so the extracted MSL corresponds to the 2.10m contour line.

3. METHODOLOGY

The CoastSat shoreline extraction process is explained in Vos et.al. (2018) and the flowchart is summarized in Fig. 3. Runs in a supervised way (user can digitize the reference shoreline from image) or classification can be fully automatic.

The CoastSat uses the Sentinel 2 bands – R (10 m), G (10m), B(10m), NIR (10m) and SWIR1 (20 meters). During the pre-process the 20m SWIR1 band is down-sampled to 10m by bilinear interpolation. For this reason the final resolution is 10 meters.

CoastSat uses a Neural Network Classifier, referred as Multilayer Perceptron implemented in the scikit-learn python library to label each pixel in one of four classes: 'sand', 'water', 'white-water' and 'other land features'. Algorithm author have trained the Neural Network (Vos, 2019b) and users don't need to deal with this question. To define the shoreline position CoastSat uses Otsu's thresholding algorithm (Vos *et al.,* 2019a) to find the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) value, computed by Eq. 1, which maximizes inter-class variance between the 'sand' and 'water' distributions, excluding upfront the pixels belonging to the 'white-water' and 'other land features' classes. MNDWI computation uses Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI)[2] short-wave infrared band (SWIRD1) - and the green band (G).

$$MNDWI = \frac{SWIR1 - G}{SWIR1 + G} \qquad (1)$$

[1] https://cosmo.apambiente.pt/data/114

[2] https://tinyurl.com/2p9d46yz

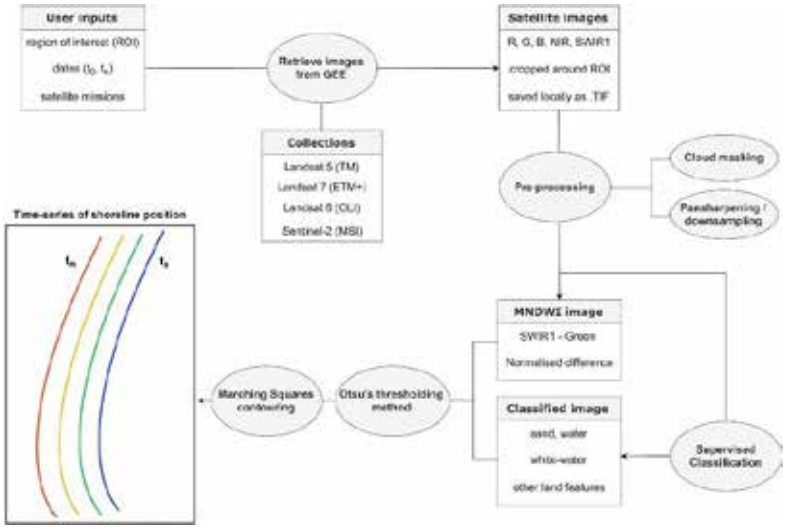


Fig. 3. CoastSat Process Flowchart (image from Vos et. al. (2018))

Using the MNDWI it is possible to classify the sentinel image pixels into sand, water and white water and thus define the interface between the ocean and the sand and extract the separation line for the moment of image acquisition.

In this study the Figueira da Foz shoreline extraction have been done only in an unsupervised way.

In Vos *et al.*(2019a) study authors used beach transect to compute statistics. In this study authors developed an alternative strategy for statistical analysis. The shoreline was extracted by CoastSat and exported in geojson format. Then was uploaded in a GIS application and converted to PTTM06/ETRS89 coordinate reference system. Shoreline nodes were extracted and the distances between these nodes and MSL reference line were calculated. Results are presented in the next section.

CoastSat extracts the shoreline based on Otsu's algorithm but user has the option to skip or keep the suggested solutions (Fig. 4). The algorithm is not perfect and is influenced by 'white-water', one of the main causes for errors in shoreline detection.

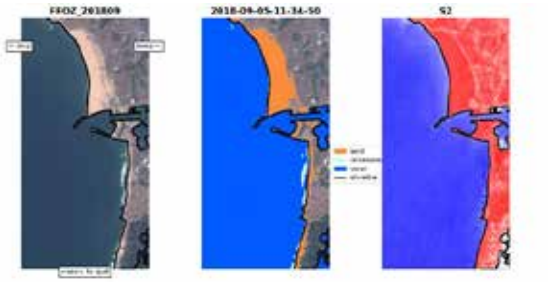


Fig. 4. CoastSat shoreline detection result - RGB Sentinel -2 image, pixel classification and MNDWI image.

4. RESULTS AND DISCUSSION

For this study authors ran the shoreline extraction process for all Sentinel-2 images collected from 01-09-2018 to 01-10-2018. The process resulted in 9253 2D points (Fig. 5). The distances between each point and the MSL contour line were calculated and the obtained statistical values are shown in Table I.



Fig. 5. 2D points automatically extracted from Sentinel-2 images with CoastSat toolkit (time series with 8 time steps).

A close analysis shows high values in the south side of Mondego River. This section of coast has small sandy beaches between the coastal protection constructions such as breakwaters.

Since CoastSat toolkit is design to classify sand versus water authors decided do reduce the analysis to the Praia do Cabo Mondego at north side of the river. For this area the process found 2895 2D points with the statistics results shown in Table I.

Table I – Statistical values (distances in meters between shoreline nodes and MSL reference line)

Statistics	Cabo Mondego Beach (North) + Cova da Gala Beach (South)	Cabo Mondego Beach (North)
Count	9253	2895
Mean	15.18	11.90
Q3	20.90	16.91
Q2 – Median	14.45	10.57
Q1	7.99	5.24
Min	0.00	0.00
Max	70.63	55.13
Range	70.63	55.13

Fig. 6 shows the 2895 points with a color ruled by their distance from the reference MSL contour line.



Fig. 6. Distances between the MSL line and the points from shoreline extracted by CoastSat

5. CONCLUSIONS

This study intends to use the CoastSat Toolkit, an open source python application developed and maintain by Vos et.al. (2019a) that provide a cheap way to obtain 30+year time-series of approximately biweekly shoreline positions with a horizontal accuracy of ~10m at any sandy coastline worldwide. The software is easy to use, freely available, open-source and is well documented. For this reasons, users can quickly learn and start to use it.

The growing database of 30+ years of satellite images freely available via GEE allow users to continuously run monitoring processes in order to extract valuable information like the coastlines time-series.

Vos *et al.* (2019a,2019c) found good results in the Narrabeen-Collaroy site with 90% of errors falling 11.2 meters. Statistical results obtained in this study show poorly results than Vos study. However, authors used validation strategies with small differences. Vos uses transects to compare *in situ* data with satellite shoreline. In this study all points were compared with a reference MSL shoreline.

The results obtained in Figueira da Foz are align with publish results, the expected horizontal accuracy for a satellite derived shoreline could be 10-15 meters.

It is proved to be a good technique for shoreline extraction from Remote Sensing Multi-spectral images. For sure for future coastal planning relies on an improved understanding of the relations between spatial patterns of coastal change.

CoastSat is a tool with unquestionable value for several stakeholders and with promising future in shoreline monitoring programs.

REFERENCES

APA, n.d. Programa COSMO. Available in https://cosmo.apambiente.pt/.(accessed in May of 2022)

Antunes C., Rocha C. and Catita C. (2017). Flood Mapping and Coastal Vulnerability. In: www.snmportugal.pt, FCUL.

ESA, 2012. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services (ESA SP-1322/2 March 2012).

Kilian Vos (2018) CoastSat GithHub repository available in https://github.com/kvos/CoastSat (accessed in May of 2022)

Kilian Vos (2019a), Kristen D. Splinter, Mitchell D. Harley, Joshua A. Simmons, Ian L. Turner, CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery, Environmental Modelling & Software, Volume 122, 2019, 104528, ISSN 1364-8152, https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528.

Kilian Vos, (2019b) Training data for: CoastSat image classification Zenodo Digital Repository. (2019) https://doi.org/10.5281/zenodo.3334147

Kilian Vos (2019c), M.D. Harley, K.D. Splinter, J.A. Simmons, I.L. Turner. Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery Coast. Eng., 150 (2019), pp. 160-174 https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.004

Sentinel 1 - Digital Elevation Model (10 meters) adjustment

P. Nunes (1), L. Veiga (1), C. Torres (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas n.º 49 - Lisboa. antunes.nunes@hidrografico.pt.

Abstract: Under the Copernicus initiative, ESA/European Commission developed several satellite based earth observation missions. This effort results in a systematic increase of openly remote sensing images and processed data. The Sentinel-1 mission is composed of two polar-orbiting satellites operating day and night, performing Radar imaging, enabling them to acquire imagery regardless of the weather conditions. The Least Square Adjustment methodology is a well-known procedure with vast applications on earth observations. The methodology used in this work runs in two steps. In the first step, authors used Sentinel-1 images publicly available on Copernicus hub and processed them with Sentinel Application Platform (SNAP) to get the Digital Elevation Model (DEM). In the second step, authors computed the coefficients for an affine transformation in 3D using the least squares algebraic method. This math function was applied to the model to improve their vertical accuracy. This article intends to describe how users can build up an open access Digital Elevation Model with 10 meters horizontal resolution from Sentinel 1 images and how they can improve their accuracy with least squares adjustment using ground control points.

Keywords: accuracy assessment, affine transformation, DEM, least squares adjustment, SAR Sentinel-1.

1. INTRODUCTION

Digital Elevation Models (DEMs) map the terrain elevation, referenced to some *vertical datum* - the surface of zero elevation to which heights are referred. This kind of data is commonly used in geographic information systems to model the topographic relief of earth. DEM can be produced by using several approaches, one of the most common are the Stereoscopic Photogrammetry, Radar or SAR interferometry, Light Detection and Ranging (LIDAR) and topographic surveys with GNSS.

Several worldwide initiatives explore satellite remote sensing data to create DEM. Those efforts result in a systematic increase of openly remote sensing images and processed data from many different sensors especially designed for earth observation.

The Copernicus program from the European Space Agency is one example. This paper studies the use of data from Sentinel-1. The Sentinel-1 mission is composed of two polar-orbiting satellites operating day and night, performing Radar imaging, enabling them to acquire imagery regardless of the weather conditions (ESA, n.d.).

The validation of the vertical accuracy is essential to ensure that the elevation data fulfill the specification. To perform such a validation, a suitable reference data set with a certain accuracy as well with a geographic coverage.

1.1. Study area

The study area - Arrábida natural park - is located in the municipalities of Setúbal, Palmela and Sesimbra, in the north margin of the Portuguese Sado river (Fig.1). A bounding rectangle with an area of 1 100 Km^2 was defined by the geographic coordinates $9,22^0$ W to $8,68^0$ W and $38,35^0$ N to $38,63^0$ N.

The current study area was chosen due to the availability of data and the terrain slope; in this coastal area the terrain changes from flat lands to high hills. The region consists of a group of mountains oriented east-northeast to west-southwest with 501 meters at its highest altitude.



Fig. 1. Study area location

The DEM with 10 meters resolution used in this study was produced from publicly available Sentinel -1A Interferometric Wide Swath (IW) Level 1 S product (ESA, n.d.).

The DEM inferred from Sentinel-1 SAR sensor was submitted to vertical quality assessment by comparing it with ground control points/benchmarks from the national geodetic network in the study area.

Authors used the Least Squares Adjustment (LSA) to compute the parameters for an affine transformation to adjust the vertical dimension. The LSA is a mathematical method commonly used to adjust geospatial data and, in this context, have been used for DEM vertical bias adjustment.

2. DATA SOURCES

The data used in this study are from two sources: the Remote Sensing data from the Copernicus-1 SAR program to build a DEM with a resolution of 10 meters and a dataset for evaluating vertical quality check and DEM adjustment.

2.1. Sentinel 1 - Digital Elevation Model

DEM was produced from a publicly available image process in the ESA Sentinel Application Platform (SNAP). The SNAP is a tool free of charge provided by ESA/ESRIN for the Earth Observation Community that offers a set of toolboxes for all Sentinel data processing tasks (Braun, 2020).

An image that covers the study area was downloaded from the Copernicus Open Access Hub. The product has the following designation and characteristics:

S1A_IW_GRDH_1SDV_20220312T183537_20220312T183602_042292_050A89_34A8

Product class description: SAR Standard L1 Product
Product level: L1
Product type: GRD

The DEM product creation process, from the obtaining image to the final model to be evaluated, is shown in Fig.2.

The terrain area imaged in each SAR resolution cell depends on the local topography. It strongly depends on the terrain slope in the plane perpendicular to the orbit (ground range direction), and on the terrain slope in the azimuth direction. This effect is used to derive the topography and elevation from SAR images (Ferretti, *et al*., 2007, Braun, 2020).

SAR data are generally sensed with a varying viewing angle greater than 0 degrees, resulting in images with some distortion related to side-looking geometry. Terrain corrections are intended to compensate for these distortions so that the geometric representation of the image will be as close as possible to the real world (Filipponi, 2019).

Range Doppler Terrain Correction is a correction of geometric distortions caused by topography, using a DEM as reference to correct the location of each pixel (Filipponi, 2019).

The geometry of topographic distortions is shown in Fig.3. The displacement Δr between B' and B" corresponds to the effect of these distortions.

In this study, the SRTM[1] (1 arc second) was used as the reference DEM. For SRTM the height information (being referred to the geoid EGM96) is automatically corrected to obtain height relative to the WGS84 ellipsoid (SNAP, 2018-2022).

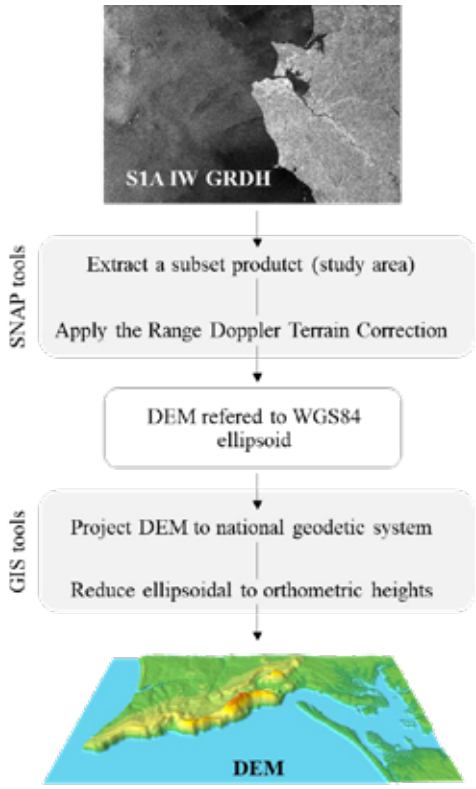


Fig. 2. From Copernicus-1 SAR product to DEM

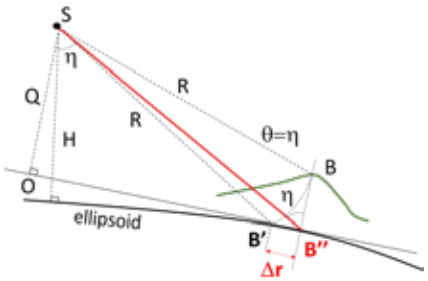


Fig. 3. Topographic distorsions in SAR imagery (SNAP, 2018-2022).

2.2. Ground Control Points (GCP)

DEM vertical accuracy assessment involves the computation of differences between the DEM cell values and reference points. For this study the reference points were a set of 54 benchmarks corresponding to physical materialization of the national geodetic network, some of them observed with GNSS and others computed from network adjustment.

[1] Shuttle Radar Topography Mission.

3. METHODOLOGY

The first objective of this study was to validate the vertical accuracy of a 10 meters resolution DEM derived from Sentinel-1 SAR images, by computing statistics over the differences between DEM cell values and GCP. The second objective was the potential improvement in DEM accuracy after a vertical bias correction with a linear transformation of geometric.

3.1. Statistical Quality Assessment

In this study the vertical accuracy of the DEM was evaluated by calculating several statistical values (Table I) based on the differences between the DEM cell values and the GCP elevation values (Elevation errors).

Table I - Statistics used in vertical accuracy evaluation

Statistical	Description
Elevation error	$Z_{diff} = Z_{DEM} - Z_{GCP}$
Mean error	$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n} Z_{diff\,(i)}}{n}$
Standard deviation error	$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Z_{diff\,(i)} - ME)^2}{n-1}}$
Root mean square error	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Z_{diff\,(i)})^2}{n}}$

3.2. Vertical Adjustment by Affine Transformation

In geometry, an affine transformation is a function between affine spaces which preserves the affine structure. In affine coordinates, which include Cartesian coordinates in Euclidean spaces, each output coordinate of an affine map is a linear function of all output coordinates. Any affine transformation is equivalent to a linear transformation followed by a translation (Kuriakose & Viswan, 2013). Pakoksung & Takagi (2016) applied this method for vertical adjustment of multiple DEM models.

Affine transformation formulation

$$Z = f(u, v, w) \quad (1)$$

$$Z_i = au_i + bv_i + cw_i + Z_0 \quad (2)$$

The affine function used in the DEM bias vertical correction follows the equation (2) where Z is CGP elevation values, (u, v, w) are DEM cell values and (a, b, c, Z_0) transformation parameters. In matrix form these equations are represented by (3).

$$A\,X = Z \quad (3)$$

Ordinary Least Squares Solution (OLS)

The OLS solution minimizes the square sum of errors and by this way gives an optimized solution for the equation system.

One of the most used approaches to calculate the least squares solution is the method of normal equations (4) whose solution is shown in (5).

$$A^T A\,X = A^T Z \quad (4)$$

$$X = (A^T A)^{-1} A^T Z \quad (5)$$

4. RESULTS AND DISCUSSION

The correlation plot between CGP and DEM elevations (Fig. 4) shows that the DEM fits very well the conformation line, which confirms the value of the calculated correlation coefficient.

The results of statistical values for the elevation errors as well as the error frequency histogram are shown in Fig.5.

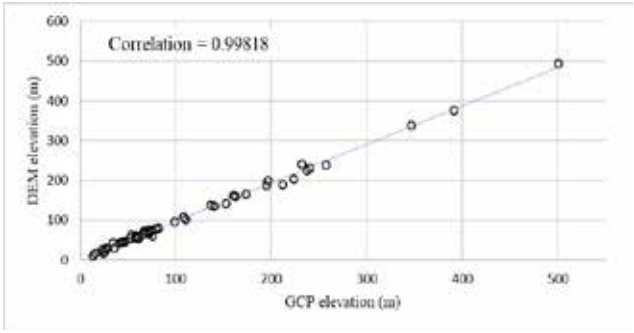


Fig. 4. Correlation plot between CGP and DEM elevations

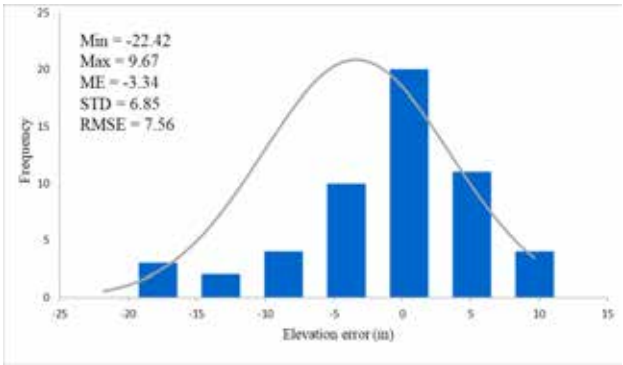


Fig. 5. Histogram of elevation errors

A linear transformation was applied and the transformation parameters were calculated. Elevation of all pixels in DEM was recalculated by using the bias correction parameter, resulting in a modified DEM (Fig. 6) whose accuracy was evaluated.

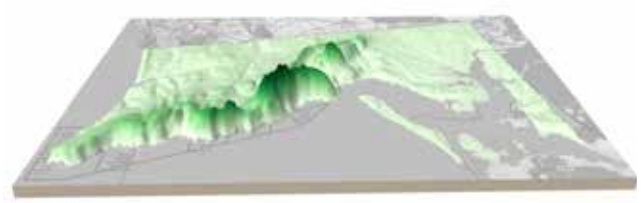


Fig. 6. 3D view of vertical bias corrected DEM

Statistical values indicate an increase in the accuracy of DEM by applying the affine transformation (Table II).

Table II – Statistics results before and after vertical bias correction

Statistisc for DEM-GCP		
	Before	**After**
Number of points	54	54
Minimum (m)	-22,42	-15,47
Maximum (m)	9,67	18,06
Mean (m)	-3,34	-0,09
Standard Deviation (m)	6,85	6,17
Root Mean Square Error	7,56	6,12
Correlation coefficient	0,99818	0,99815

The surface of differences between the adjusted DEM and the original DEM was created and the spatial distribution of these differences is shown in Fig. 7.

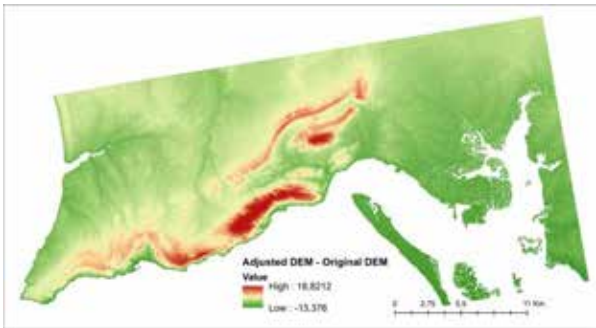


Fig. 7. Surface of differences between Adjusted DEM and the Original DEM.

It is clear that the highest values of the differences are located in the areas of greatest slope and highest altitude.

The affine transformation improved the final accuracy of the DEM; however, the results show an appreciable difference between the minimum and maximum vertical error values. This result can be justified, among other reasons, by the geometric correction based on the SRTM DEM.

In the process of creating a DEM from a SAR image the quality of the reference DEM has a strong impact on the SAR results, and artifacts in the reference DEM can potentially introduce additional errors (Braun, 2020).

5. CONCLUSIONS

This study started by evaluating the quality of a DEM created from a Sentinel-1 SAR image. DEM elevations were compared to elevations from a set of control points and statistical parameters of the differences were calculated.

After bias correction using a linear transformation, the DEM validation statistics were recalculated, which showed that the adjustment improved the vertical accuracy of the DEM.

DEMs on vertical precision depend on location, errors of reference points, terrain characteristics and surface properties (Pakoksung and Masataka, 2015).

Remote Sensing observation sensors and techniques is a very active scientific field, their researchers are pushing forward the boundaries of earth observation data. Space agencies like NASA and ESA offer multiple sources of data, openly ready to use. However, those techniques are not perfect and still need highly quality (and accurate) *in situ* data for mathematical adjustment techniques or statistical accuracy quantification.

This study shows the need for users to develop methodologies for accuracy quantification and cross check validation of remote sensing data and field observation to find if those datasets fit their study purposes.

This study aims to present a simple methodology for evaluating and improving the vertical accuracy of a three-dimensional model. The quality assessment has been applied to a DEM but could easily be applied, for example, to Lidar data in coastal areas if there is *in situ* data for comparison.

REFERENCES

Braun, Andreas. "Retrieval of digital elevation models from Sentinel-1 radar data – open applications, techniques, and limitations" *Open Geosciences*, vol. 13, no. 1, 2021, pp. 532-569. https://doi.org/10.1515/geo-2020-0246.

ESA (n.d.). Sentinel Online, European Space Agency (ESA) available on https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview.

Ferretti, *et al*., 2007. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, TM-19.

Filipponi, F., 2019. Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. MDPI Journals, Proceedings, 2019, 18,11, pp. 3-4.

Kuriakose, E. & Viswan, A., 2013. "Remote Sensing Image Matching using Sift And Affine Transformation". *International Journal of Computer Applications*, vol. 80, no 14, 2013.

Pakoksung, K. & Masataka, T., 2015. "Digital elevation models on accuracy validation and bias correction in vertical." *Modeling Earth Systems and Environment* 2 (2015): 1-13.

SNAP 8.0.0 Desktop Help file, 2018-2022.

A rede Argo na área do Atlântico nordeste (Portugal continental e arquipélagos dos Açores e Madeira)

R. Pinheiro (1), P. Martins (1), T. Silveira (1,2), J. Teixeira (2), M. Carapuço (2)

(1) Escola Superior de Tecnologia de Setúbal do Instituto Politécnico de Setúbal. ritalage.pi@gmail.com

(2) Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P.

Resumo: A rede Argo é uma infraestrutura de observação do oceano que integra, atualmente, aproximadamente 4000 flutuadores autónomos e derivantes dispersos pelo oceano, com o objetivo de medir um conjunto de propriedades da água do mar. Desde 1998, os *core* Argo medem a temperatura e salinidade ao longo da coluna de água até aos 2000 m de profundidade, transmitindo os dados medidos a cada 10 dias, via satélite, os quais são disponibilizados pública e gratuitamente através de plataformas *online*. O presente trabalho apresenta a avaliação feita sobre a cobertura espacial e temporal da rede Argo na área do Atlântico nordeste que abrange Portugal continental e os arquipélagos dos Açores e Madeira, ao longo dos últimos 25 anos, evidenciando os locais com maior e menor densidade de dados com o objetivo de apoiar a decisão de instalação de futuros flutuadores. Apresenta-se a análise preliminar da evolução da temperatura da água do mar à superfície e em profundidade.

Palavras-chave: Argo, atlântico, oceano, temperatura.

1. INTRODUÇÃO

A observação do oceano é crucial na geração de dados de apoio à caracterização dos processos oceânicos. O desenvolvimento tecnológico tem permitido aumentar significativamente a criação e expansão de redes de plataformas de observação e monitorização do oceano, que fornecem dados *in situ* e em tempo quase real.

O programa internacional Argo, estabelecido em 1998, consiste numa rede de flutuadores derivantes que medem um conjunto de parâmetros ao longo da coluna de água - entre a superfície e profundidades de, pelo menos, 2000 m - em ciclos de 10 dias (Wong *et al.*, 2020). Os flutuadores Argo (tipicamente apenas designados por Argo), por serem instrumentos de medição autónomos, vieram aumentar significativamente a capacidade de monitorização do oceano, permitindo uma maior cobertura geográfica e temporal. O programa internacional Argo tem atualmente perto de 4000 flutuadores ativos, tendo como objetivo uma cobertura de dados de um flutuador por uma célula de 3° por 3° de latitude e longitude, por mês no oceano global. Esta cobertura é considerada suficiente para estudar os padrões climáticos e para apoiar o desenvolvimento de modelos oceanográficos (Roemmich *et al.*, 2019).

Os Argo são adquiridos, lançados e operados por instituições de investigação e desenvolvimento (I&D) à escala nacional servindo, no entanto, para um objetivo maior – a geração e disponibilização de dados que alimentam uma rede global. Após a lançamento do flutuador, este imerge até uma profundidade de 1000 m, onde se mantém à deriva por um período de 9 dias. Após este período, ao 10 dia, o flutuador desce a profundidades superiores, de cerca de 2000 m (*core* Argo) ou até 6000 m (*deep* Argo). Quando o flutuador atinge a maior profundidade, este inicia a sua ascensão, fazendo medições de um conjunto de parâmetros da água do mar. Os *core* Argo e os *deep* Argo medem a pressão (profundidade), salinidade e temperatura da água do mar; os Argo biogeoquímicos, medem ainda o pH, oxigénio, nitratos, clorofila, partículas em suspensão, e irradiação ao longo de um perfil vertical da coluna de água. Quando emersos, os flutuadores transmitem, via satélite, a sua posição e os dados adquiridos. Este encadeamento de ações designa-se um ciclo Argo.

Em articulação com dados adquiridos através da operação de outras plataformas móveis e fixas de observação do oceano, rede Argo fornece dados que permitem detetar, por exemplo, ciclos sazonais de variação da temperatura à superfície, detetar tendências de aquecimento plurianual e decadal, desenvolver modelos de previsão, e avaliar impactes nos ecossistemas e em atividades relacionadas com a economia azul. A análise da temperatura do oceano recorre, cada vez mais, a dados de flutuadores Argo, em complemento de outros métodos (e.g., Riser *et al.,* 2016; Desbruyères, *et al.*, 2021; Lyu et al., 2021).

Neste trabalho descreve-se a cobertura espacial e temporal de medições oceanográficas feitas a partir da rede Argo, desde 1998 até 2021, no Atlântico nordeste, na área que abrange Portugal continental e os arquipélagos dos Açores e Madeira, e apresentam-se resultados preliminares da análise da evolução, superficial e em profundidade, da temperatura da água do mar.

2. METODOLOGIA

2.1. Área geográfica

A área em estudo corresponde à área do Atlântico nordeste que abrange Portugal continental e os arquipélagos dos Açores e Madeira, estendendo-se desde 30º N até 45º N em latitude e 6º W até 40º W em longitude. Esta área corresponde à METAREA II sob responsabilidade nacional.

2.2. Dados

2.2.1. Aquisição

Os dados provenientes dos flutuadores foram descarregados da plataforma *United States Global Ocean Data Assimilation Experiment* (USGODAE) Argo Global Data Assembly Center (*DAC*) que disponibiliza dados diários dos vários DAC nacionais em formato NetCDF (*Network Common Data Form*). NetCDF é um conjunto de bibliotecas de *software* e formatos de dados, desenvolvidos pela comunidade UCAR/Unidata, que suportam a criação, acesso e partilha de dados científicos estruturados e não estruturados. É também um padrão comunitário para disseminar dados muito utilizado na comunidade científica, e em especial em oceanografia por ser muito flexível na análise e representação de dados, como por exemplo, dados discretos de CTD (*Condutivity, Temperature and Depth)* ou dados matriciais de SST (*Sea Surface Temperature*). A série descarregada no âmbito do presente estudo abrange o período de 26 de maio de 1998 a 28 de dezembro de 2021.

2.2.2. Pré-Processamento

Para extrair a informação relevante recorreu-se à linguagem de programação Python™, por operar sobre uma licença aberta e livre, por ser versátil e de fácil aprendizagem, permitindo a automação de tarefas, análise e visualização de dados. Utilizou-se as bibliotecas NetCDF4, específica para operar ficheiros NetCDF e NumPy, que agrega uma grande coleção de funções matemáticas de alto nível para operar matrizes grandes e multidimensionais.

Foi feita a compilação das referências espaciais e temporais dos dados dos flutuadores, bem como outra informação relevante como os parâmetros medidos. Criou-se um *script* que automatizou a leitura do conjunto de ficheiros NetCDF descarregados e a extração desta informação para uma série de ficheiros no formato CSV (*Comma Separated Value*) para manipulação em *software* SIG (Sistemas de Informação Geográfica), bem como em folhas de cálculo para a descrição e avaliação das densidades espaciais dos flutuadores para a área de interesse.

Para a análise da temperatura, criou-se um *script* (figura 1) com o objetivo de compilar apenas os dados validados de temperatura em profundidade em formato CSV para posterior análise.

2.2.3. Pós-Processamento

Com os dados foram criados mapas de densidades de ocorrências de ciclos Argo para uma malha de 3º por 3º e de 1º por 1º de latitude e longitude para a área de estudo. Recorreu-se ao *software* ArcGIS da ESRI para visualização da distribuição dos ciclos no tempo e no espaço, bem como a distribuição de densidades de dados.

Com base na malha criada, selecionou-se os locais que: 1) contivessem ciclos que abrangessem o maior período temporal; 2) contivessem o maior número de ciclos, e 3) permitissem uma melhor cobertura da área de estudo. Para os locais selecionados, analisaram-se os perfis de temperatura e criaram-se séries temporais de temperatura média à superfície e para várias camadas de profundidade até aos 2000 m.

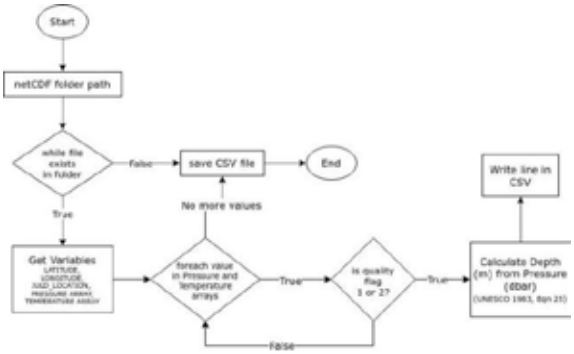


Fig. 1. Esquema pré-processamento dos dados.

3. RESULTADOS

3.1. Densidade de cobertura da rede Argo

A rede Argo na área em estudo registou um aumento de flutuadores na primeira década de operação do programa, atingindo um máximo de 117 plataformas ativas em 2007 e 2008 (gráfico de barras da figura 2). Registou-se um decréscimo de flutuadores desde então, embora tenha havido um aumento significativo em 2021.

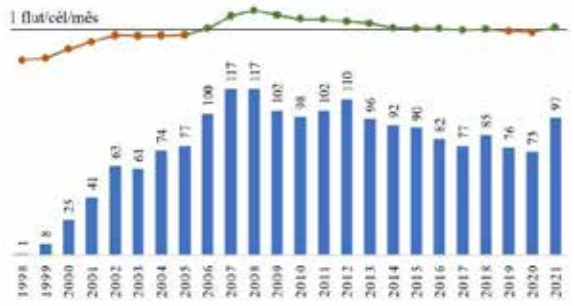


Fig. 2. N.º de flutuadores Argo por ano na área de estudo (gráfico de barras, localização inferior) e indicador de nº médio de flutuadores por célula de 3°x3° por mês em relação ao valor alvo (gráfico superior).

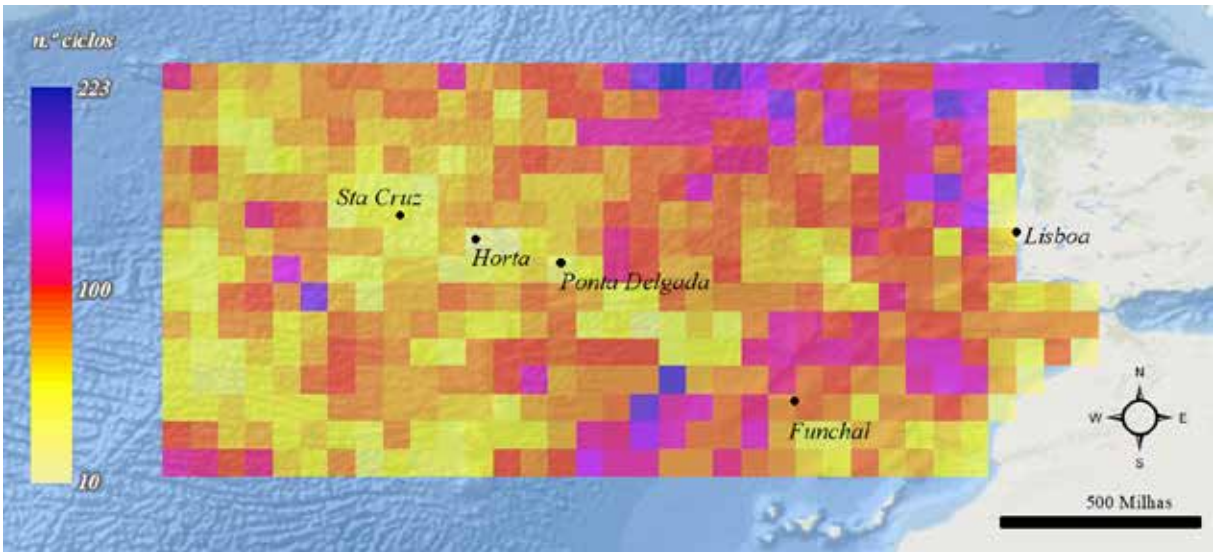


Fig. 3. Mapa de densidade espacial dos ciclos de flutuadores Argo em células de 1ºx1ª para o período de 1998 a 2021. Mapa: Esri

São necessários 53 flutuadores ativos, por mês, na área de estudo para satisfazer o objetivo do programa Argo: um flutuador por cada célula de 3°x3°. Observa-se que a partir de 2006 este objetivo foi alcançado, com exceção dos anos de 2019 e 2020, atingindo-se em 2008 a maior cobertura registada, com uma média de 1.6 flutuadores ativos por célula e por mês (gráfico superior da figura 2), embora a distribuição espacial não seja regular. A figura 3 representa a distribuição de ciclos Argo na área de estudo e para o período entre 1998 e 2021 sob a forma de mapa de densidades numa malha de 1º por 1º de latitude e longitude. Verifica-se a cobertura de flutuadores Argo em toda a área de estudo, com uma frequência de, pelo menos, 10 ciclos por célula. Regista-se maior concentração de ciclos na área nordeste da área de estudo e, pontualmente, a norte e oeste do arquipélago da Madeira (Funchal) e a sudoeste da ilha das Flores nos Açores (Sta Cruz).

Verifica-se menor densidade na cobertura de dados Argo na metade oeste da área de estudo, incluindo a área envolvente do arquipélago dos Açores e nas regiões que se sobrepõem à plataforma continental, incluindo a região do Golfo de Cadiz (a sul de Portugal continental), por serem locais com menor profundidade.

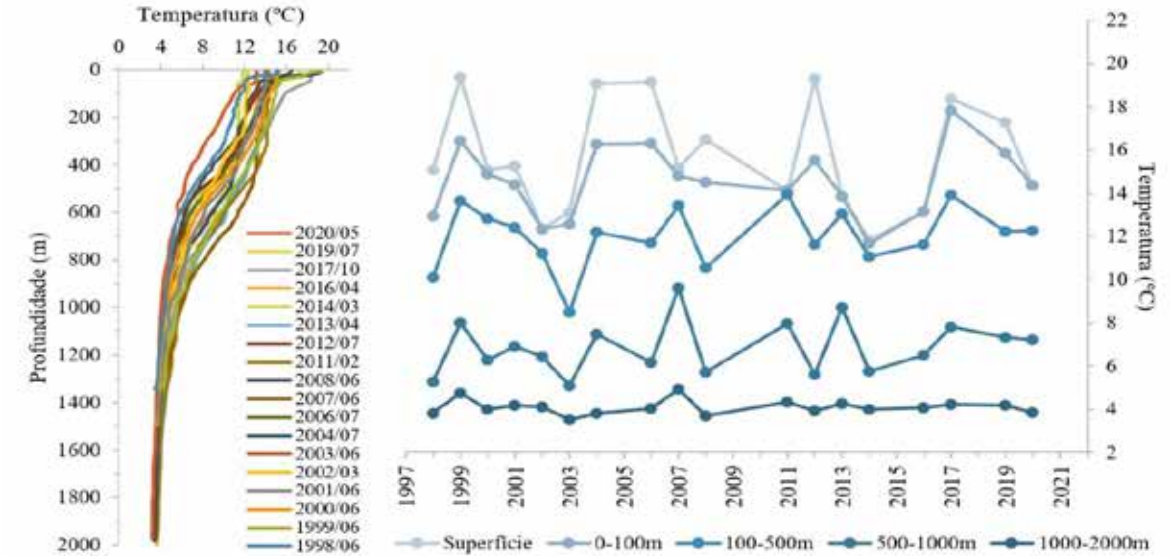


Fig. 4. Perfis de temperatura da água do mar extraídos dos ciclos Argo medidos no local da área de estudo para onde existe o registo mais antigo (1998) (gráfico da esquerda) e variação da temperatura à superfície e a várias profundidades ao longo do tempo (gráfico da direita).

3.2. Evolução da temperatura

Na figura 4 apresentam-se os dados extraídos dos ciclos Argo para a célula da malha (1ºx1º) onde existe o registo mais antigo medido com estes instrumentos, correspondente à série que abrange o maior período temporal na área de interesse (1998 a 2020). Não existem dados para todos os anos e os meses dos registos não são consistentes. Na imagem apresenta-se apenas um ciclo por ano, correspondente ao mês de junho, ou mais próximo deste. As lacunas nos dados, quer nos anos, quer nos meses de registo, dificultam a análise dos dados nas camadas superficiais e subsuperficiais onde a sazonalidade é bem marcada. No entanto, em profundidade, é possível proceder-se a uma análise mais fidedigna das tendências de evolução da temperatura da água do mar.

4. CONCLUSÕES

A rede Argo providencia dados que cobrem toda a área de estudo, ao longo dos últimos 25 anos. Esta cobertura é, no entanto, irregular no espaço e no tempo, tendo-se assistido a variações no número de flutuadores, com valores máximos atingidos nos anos de 2007/2008 (117) e 2012 (110). Desde 2006, a cobertura média mensal tem assegurado os objetivos traçados pelo programa internacional Argo para a monitorização do oceano global de pelo menos 1 flutuador por célula de 3º por 3º por mês, com exceção dos anos de 2019 e 2020. No entanto, o espaçamento é bastante irregular.

As séries temporais de dados Argo apresentam algumas lacunas temporais o que dificulta a análise da evolução da temperatura da água do mar ao longo do tempo, limitando a identificação de padrões sazonais. No entanto, constituem uma base de dados importante para a análise da evolução das camadas intermédias do oceano, pelo menos até aos 2000 m de profundidade.

O presente trabalho pretende ser um contributo para a avaliação da existência de dados na área em estudo, identificando as áreas onde as densidades são menores. Nesta sequência, este trabalho pode apoiar a identificação dos locais mais relevantes para o lançamento de flutuadores Argo incluindo os flutuadores que serão adquiridos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P. no âmbito dos projetos "Observatório Atlântico - Infraestrutura de Dados e Monitorização" e “Observa.PT”.

Agradecimentos
Este trabalho foi realizado pelos primeiros dois autores no âmbito dos estágios da Licenciatura em Tecnologias do Ambiente e do Mar da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Setúbal, enquadrados no projeto pré-definido "Observatório Atlântico - Infraestrutura de Dados e Monitorização", financiado pelo Programa "Crescimento Azul" 2014-2021 do Programa EEA Grants.

REFERÊNCIAS

Desbruyères, D., Chafik, L. e Maze, G. (2021). A shift in the ocean circulation has warmed the subpolar North Atlantic Ocean since 2016. *Communications Earth & Environment*, 2, 48.

Lyu, K., Zhang, X. e Church, J.A (2021). Projected ocean warming constrained by the ocean observational record. *Nature Climate Change*, 11, 834–839.

Riser, S., Freeland, H., Roemmich, D. *et al.* (2016). Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. *Nature Climate Change,* 6, 145–153.

Wong, A.P.S., Wijffels, S.E., Riser, S.C. *et al.* (2020). Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats. *Frontiers in Marine Science* 7:700.

Roemmich, D., Alford, M.H., Claustre, H. et al., (2019). On the Future of Argo: A Global, Full-Depth, Multi-Disciplinary Array. *Frontiers in Marine Science*. 6:439.

Índice de Autores

A
J. Almeida....303, 311, 315
S. Almeida....363
M. Alves....111, 363
J. Alves....175
A. Amorim....139
M. M. Angélico....187
P. Avilez-Valente....119, 171

B
M. A. Baptista....171
P. Baptista....215
A. Barbosa....299
C. Barrera....143, 333
M. Barreto....35, 337
L. Bastos....119, 211
A. Batista....291, 295
P. Batista....349
V. Belvisi....199
A. Bernardes....61
F. Bessa....319
R. Bettencourt da Silva....273, 281, 287, 311, 327
B. Biguino....97
A. Bio....119, 211
A. Bizarro....235
C. Borges....55, 93, 151, 277, 287, 291
J. Borges de Sousa....79
P. Brasil....51
A. Brito....97, 151, 277, 315
P. Brito....263, 269, 307
V. Brotas....103, 187
N. Buenaventura....311
J. Burris....333

C
D. Cabecinhas....349, 353
M. Caccia....353
M. Cachão....203, 235, 259
C. Caeiro....341
Mário Caetano....61
Miguel Caetano....269
S. Caetano....299
R. Caldeira....175
A. Campos....259
T. Candeias....43
R. Capitão....345
M. Carapuço....375
Z. Cardoso....43
D. Carinhas....107, 111, 127, 155, 159, 163, 367
D. Casalbore....199, 203
P. Castellanos....97
D. Castro....83
N. Catarino....51
S. Cavaleiro....83
R. Chumbinho....357
A. Cianca....333
V. Conceição....83
C. Correia....299
Carlos Costa....93, 131
César Costa....193, 341
J. Costa....79
M. Costa....79
E. Craveiro....115
A. Cravo....299
G. Gómez-Pimpollo Crespo....19
J. Cruz....39
J. P. C. Cruz....151
M. Cruz....119
C. Cunha....179
S. Cunha....223

D
J. Dias....97
P. S. Dias....79
T. Dias....69
F. Diniz....167, 191
T. Drago....259
F. Duarte....341
J. F. Duarte....223, 227
J. Dubert....99

E
J. Escartín....349
R. Esteves....115, 147, 167, 277
M. Eusébio....323

F
L. Favareto....97, 151
A. Ferreira....97, 151
A. M. Ferreira....135
A. S. Ferreira....79
C. Ferreira....299
Ó. Ferreira....135
P. Ferreira....239
P. Fonseca....259
C. Fortes....87, 135, 193, 341, 345

G
J. Galante....79
D. Gamboa....207
V. Puente García....123
J. L. Garzon....135, 345
R. Gaspar....323
M. Gatta....35, 131, 337
A. H. Gomes....87
G. Gomes....295
L. Gomes....273, 283, 291, 311
C. Gonçalves....291, 295
J. Gonçalves....131
J. A. Gonçalves....211
P. Gonçalves....79, 357
C. J. González....27
F. Gonzalez....239
J. Gouveia....43
H. Granja....211
S. Groom....187
V. Martín Guijarro....123
A. Guilherme....319

H
K. Hartmann 55
V. Henriques 259
J. Heumüller 151

I
I. Iglesias..... 119, 211
P. Infante..... 111
S. Innocentini..... 203, 219

J
J. Jacob..... 299
C. de Jongh..... 23
A. Jorge da Silva 51, 357

K
K. Karantzalos 349
K. Kebkal..... 349
T. Kuhn 239

L
L. Lamas..... 97, 143, 147, 179, 183
N. Lapa..... 223
B. Larsen 23
J. F. R. Leite..... 107
C. Lemos 155, 159, 163
R. Lemos 193
M. J. Lima..... 299
V. Lima..... 167, 171
V. Lobo..... 35, 337
J. Lobo-Arteaga 263
H. Lopes..... 167
L. Lopes..... 219

M
J. Madeira..... 199, 203
J. Magalhães 99, 139
V. Magalhães 263
L. Maigne..... 349
A. Mallios..... 349
A. Manz 345
E. Marino 239
C. Marques..... 39, 47, 51, 55
F. Marques..... 51
P. R. Marques 307
A. Martinho..... 111
I. Martins..... 143, 147, 183, 191
P. Martins..... 375
A. Mateus 243
A. Matos 31, 299
A. Medeiro 61
W. Melo..... 119
R. Mendes 79
A. Mendonça..... 107, 341
T. Mertzimekis 349
M. Mil-Homens..... 263, 269
MINDeSEA Team..... 239
M. Miranda 171
P. Miranda..... 175
C. Monteiro..... 39, 55
S. Moreira..... 227, 235
V. Morgado 273, 281, 283, 311
M. Mosqueira 277
A. Moura..... 55, 65

N
Y. Nahoara..... 263
J. Neiva..... 79
M. G. Neves..... 193
K. Nikolopoulos..... 349
R. Nolasco..... 99, 103, 139
Ana Nunes..... 69
André Nunes..... 183
Paulo Nunes 73, 147, 363, 367, 371
Pedro Nunes..... 103, 187
J. Nyberg..... 239

O
A. Oliveira 139, 223, 227, 243, 295
F. Oliveira..... 215
M. Oliveira 79, 357
P. B. Oliveira 99, 103, 139, 187
E. Olmedo..... 97
M. Olsen 311
R. Omira 207

P
C. Palma.....97, 151, 273, 277, 281, 283, 287, 291, 295, 303, 311, 315, 319, 323, 327
S. Pardo..... 187
A. Pascoal 349, 353
P. Patrício..... 61
F. Pedrera 357
J. Pereira 79
M. Picoto 159
L. V. Pinheiro..... 87, 193
R. Pinheiro..... 375
J. Pinho 119, 211
J. P. Pinto..... 51, 55, 115, 215, 357
S. Plecha 183
A. Pombo..... 277
J. Pombo..... 223, 247, 251
T. Pulquério..... 303

Q
R. Quartau 199, 203, 219, 235
J. M. Quijano 27

R
I. Raimundo 93
G. Ramalho..... 79
P. Redweik..... 219
A. Reis 65
L. Reis..... 255
M. T. Reis..... 135, 345
R. Reis 341
H. Ribeiro..... 61
M. Ribeiro 79
J. del Rio 357

A. C. Rocha 323, 327
A. Rodrigues..... 199, 203, 223, 231, 247, 251
P. Rodrigues 155
V. Rodrigues 107
C. Romagnoli..... 199

S
P. de Saint Léger 357
P. Sanches..... 65, 73
F. Sancho..... 215
A. I. Santos 139, 243
F. Santos..... 215
J. A. Santos 87
M. Santos 291, 295
P. Santos..... 303
Rita Santos 227, 243, 295
Rúben Santos..... 203
R. A. Santos 79
L. Sebastião 349, 353
Ana M. Silva 345
António. M. Silva 65
D. C. P. Silva 127, 255
F. Silva 163
J. C. B. da Silva..... 99
L. G. Silva 193
P. A. Silva..... 215
R. Silva 51
T. Silveira 375
C. Singdahl-Larsen..... 311
A. Sivertsen 51
R. E. Soares..... 193
P. Sobral 319
A. Sousa 357
C. Sousa..... 31

T
R. Taborda 345
J. Tasso-Sousa..... 333
J. Teixeira..... 375
A. Teles-Machado..... 97
P. Terrinha 207
C. Torres 371
J. R. Torres 27
A. Tracana..... 151, 187

V
E. Valente..... 235, 319
F. Vasquez..... 111
L. Veiga..... 39, 69, 367, 371
F. Veloso-Gomes 119
L. Venâncio..... 79
A. Veronez 263
J. Vicente..... 39, 47, 65, 73
J. Vieira..... 119
A. Vinhas 223, 231
J. Vitorino 143

W
C. Waldmann..... 333

Z
N. Zacarias 97, 139, 167, 179, 191, 243, 277
A. C. Zózimo..... 135, 345

IMAGEM: Extrato da Carta Náutica 26409 | Caminha a Vila Praia de Âncor

APOIOS

KONGSBERG

3p consultores

FUGRO

qualitas instruments

GISCAD

PORTO DE SETUBAL

Porto de Lisboa

AQUIMAR

esri Portugal

COFINANCIAMENTO

mar 2020

PORTUGAL 2020

UNIÃO EUROPEIA

hidrográfico marinha·portugal

INSTITUTO HIDROGRÁFICO DE LA MARINA · ESPAÑA

Instituto Hidrográfico
Rua das Trinas, n.: 49 | 1249-093
Lisboa | Portugal
Tel.: +351 210 943 000
mail@hidrografico.pt

www.hidrografico.pt