



XII CPGZC

XII CONGRESSO SOBRE PLANEAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA

Zonas Costeiras Inteligentes

9, 10 e 11 de
setembro de 2026

Faculdade de Engenharia
da Universidade do Porto

LIVRO DE RESUMOS

Patrocinadores Bronze

Apoio institucional

Título

Livro de resumos do XII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa

Edição

APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos

Comissão Editorial

Ana Carla Garcia
Paulo Rosa Santos

Data da edição

9 de setembro de 2026

ISBN 978-989-8509-54-3

APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos
a/c Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Av. do Brasil, 101 - 1700-066 LISBOA - PORTUGAL
Tel. 21 844 34 28 | aprh@aprh.pt | www.aprh.pt



ÍNDICE

COMISSÕES	9
 PLANEAMENTO E GESTÃO COSTEIRA	11
49 REVISITAR AS RECOMENDAÇÕES DO PROJETO EUROSION E INDICADORES ATUAIS NA EUROPA.....	13
<i>Francisco TAVEIRA PINTO, Luciana das NEVES</i>	
2 ANÁLISE TEMPORAL DA EROÇÃO NO ALGAR DE BENAGIL COM BASE EM MODELOS DIGITAIS DE ELEVADA PRECISÃO OBTIDOS POR LIDAR	16
<i>Guilherme S. ROCHA, Cláudio SOUSA, Luís SOUSA</i>	
4 ONDE COMEÇA O MAR? GOVERNANÇA E PLANEAMENTO DO CONTÍNUO TERRA-MAR EM PORTUGAL	18
<i>Nicolás SANTELICES ARTAZA & Paulo CONCEIÇÃO</i>	
55 POLÍTICAS PÚBLICAS E GOVERNAÇÃO DO RISCO COSTEIRO: A JUSTIÇA CLIMÁTICA NO PLANEAMENTO TERRITORIAL DO MUNICÍPIO DE OVAR.	20
<i>Pedro Seixas SILVA, Myriam LOPES, Peter ROEBELING</i>	
 MORFODINÂMICA COSTEIRA E ESTUARINA	21
3 EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DO LITORAL DA REGIÃO CENTRO DE PORTUGAL (2018- 2025): ESMORIZ-FURADOURO, SÃO JACINTO E COSTA NOVA-VAGUEIRA	23
<i>Ana Margarida FERREIRA, Carlos COELHO, Paulo A. SILVA</i>	
28 MEDIUM-TERM MORPHOLOGICAL EVOLUTION OF THE DOURO SAND SPIT FOLLOWING BREAKWATER CONSTRUCTION.....	26
<i>Mahmoud ABOUHALIMA, Luciana das NEVES, Hugo LOPES, Francisco TAVEIRA-PINTO, Paulo ROSA-SANTOS</i>	
25 INTERVENÇÕES DE ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DE SEDIMENTOS: AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO MODELO IODA	29
<i>Catarina CARVALHO, Ana Margarida FERREIRA, Carlos COELHO</i>	
24 EFEITO DO TRANSPORTE SEDIMENTAR EÓLICO EM ESTRUTURAS DE ACESSO A PRAIAS.....	32
<i>Frederico ROMÃO, Fabiana CORREIA, Paulo SILVA, Márcia LIMA, Susana COSTAS, Carlos COELHO</i>	



47	INFERING TOPOGRAPHIC CHANGES IN INTERTIDAL FLATS OF THE SADO ESTUARY USING SENTINEL-2 IMAGERY.....	35
	<i>Matilde CORREIA, Carlos David SANTOS</i>	
	RISCOS E RESILIÊNCIA COSTEIRA NA CPLP	39
40	CARATERIZAÇÃO DO CLIMA DE ONDAS E PERIGOS COSTEIROS DA CIDADE DA BEIRA. MOÇAMBIQUE.....	41
	<i>Rogério CUINHANE, José FERREIRA, Conceição FORTES, Rui CAPITÃO, Liliana PINHEIRO</i>	
51	RESILIÊNCIA CLIMÁTICA DO SETOR ENERGÉTICO NA GUINÉ-BISSAU: O CONTEXTO DA INUNDAÇÃO E DA EROÇÃO NUMA ABORDAGEM MULTIRRISCO	43
	<i>Luciana das Neves, Hilario CASTRO LARA, Els VAN UYTVEN, Florian SPARAVIER</i>	
34	ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR, SUBSIDÊNCIA DO SOLO, URBANIZAÇÃO, CHUVAS TORRENCIAIS: DESAFIOS PARA A SUSTENTABILIDADE DE RECIFE	46
	<i>Jaime J. S. P. CABRAL, Gastão C. FONSECA NETO, Marcos A. B. SILVA JUNIOR, Arivânia B. RODRIGUES, Wendson O. SOUZA</i>	
42	DA APLICAÇÃO NACIONAL À TRANSFERÊNCIA INTERNACIONAL: POTENCIAL DA FERRAMENTA COAST NA GESTÃO COSTEIRA EM PAÍSES CPLP	50
	<i>Márcia LIMA, Carlos COELHO</i>	
29	SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA PARA PROMOVER A RESILIÊNCIA COSTEIRA: UM ESTUDO DE CASO NO NORTE DE PORTUGAL	53
	<i>Carla ROLO ANTUNES, Miguel AZEVEDO COUTINHO</i>	
	ATENUAÇÃO DA ENERGIA DAS ONDAS E PROTEÇÃO COSTEIRA.....	55
23	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO DE MODELOS FÍSICOS DE VEGETAÇÃO NA ATENUAÇÃO DA ENERGIA DAS ONDAS: CONTRIBUTOS PARA SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA NA DEFESA COSTEIRA	57
	<i>Maria MENDES, José PINHO</i>	
11	MODELAÇÃO DO POTENCIAL DE ATENUAÇÃO DA ENERGIA DAS ONDAS POR UM SISTEMA DE AQUACULTURA	60
	<i>Filipe MIRANDA, Rui COSTA-ANTUNES, Paulo ROSA-SANTOS, Francisco TAVEIRA-PINTO, Tiago FAZERES-FERRADOSA</i>	
26	ANÁLISE DO EFEITO DO APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS PARA A PROTEÇÃO COSTEIRA NA ZONA NORTE DE PORTUGAL	63
	<i>Daniel CLEMENTE, Felipe TEIXEIRA-DUARTE, Paulo ROSA-SANTOS, Francisco TAVEIRA-PINTO</i>	



MONITORIZAÇÃO E GESTÃO COSTEIRA	67
33	
PORTUGAL LITORÂNEO: MUDANÇAS COSTEIRAS, POLÍTICAS E SOCIAIS	69
<i>Luisa SCHMIDT, Pedro PRISTA</i>	
20	
MONITORIZAR PARA ANTECIPAR: DA OBSERVAÇÃO COSTEIRA À INTELIGÊNCIA TERRITORIAL	71
<i>José Luís PINHO, Helena GRANJA</i>	
1	
NOVAS TECNOLOGIAS NA MONITORIZAÇÃO E GESTÃO DE SISTEMAS AQUÁTICOS: DIGITALIZAÇÃO E ROBÓTICA DE ENXAME	74
<i>Ana BIO, Isabel IGLESIAS, Rodrigo OZÓRIO, Francisco ARENAS, Rui ROCHA, Gonçalo FERREIRA, Micael S. COUCEIRO</i>	
56	
AMOSTRAGEM ADAPTATIVA COM AUVS USANDO DESCRITORES DE REGIMES DE TEMPERATURA NO CANHÃO DA NAZARÉ	76
<i>Pedro Marques LOBÃO, João BORGES DE SOUSA, Renato MENDES</i>	
FERRAMENTAS PARA PREVISÃO E MONITORIZAÇÃO COSTEIRA	79
8	
COASTA: VÍDEO-MONITORIZAÇÃO E DEMOCRATIZAÇÃO DO HIDRALERTA PARA A GESTÃO DO RISCO COSTEIRO EM PORTUGAL	81
<i>Larize LIMA, Filomena MARTINS, Conceição FORTES, Liliana PINHEIRO</i>	
9	
COASTSCAN - PLATAFORMA INTEGRADA PARA VÍDEO MONITORIZAÇÃO COSTEIRA.....	83
<i>Diogo OLIVEIRA, André CARDOSO, Francisco CERDA, Bruno ROCHA, Paulo BAPTISTA</i>	
48	
PRAIA DA VITÓRIA: DESEMPENHO DO SISTEMA HIDRALERTA	86
<i>Conceição FORTES, Liliana PINHEIRO, Catarina ZÓZIMO, Larize LIMA, Mauro MACIEL, Sofia GOULART</i>	
54	
ATLANTICSENSE: UMA PLATAFORMA METEOCEANOGRÁFICA OPERACIONAL PARA PREVISÃO DE PERIGOS COSTEIROS EM PORTUGAL.....	88
<i>Nícolás de Assis BOSE, Soraia ROMÃO, Luíz Pedro ALMEIDA, Catarina CECÍLIO, Andreia SILVA, Francisco CAMPUZANO, Caio FONTELES</i>	
22	
DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS DE MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA E MORFODINÂMICA PARA APOIO À PREVISÃO E ALERTA NO ESTUÁRIO DO RIO CÁVADO E ZONA COSTEIRA ADJACENTE.....	91
<i>Miguel PEREIRA, José PINHO</i>	
17	
UTILIZAÇÃO DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA REMOTA NA SELEÇÃO DAS ÁREAS MAIS ADEQUADAS PARA A PRODUÇÃO DE MACROALGAS NA COSTA PORTUGUESA: SACCHARINA LATISSIMA	94
<i>Luís RESENDE, João M. NETO, Zara TEIXEIRA, Ana GARCIA, Margarida H. MATIAS</i>	



ESTRUTURAS COSTEIRAS E OFFSHORE	97
31	
DAMAGE EVOLUTION IN THE HEAD SECTION OF A BREAKWATER	99
<i>Rute LEMOS, Ana MENDONÇA, Conceição J.E.M. FORTES, Carolina MARTINEZ, Tiago LOPES, Lucas BRITO, Bruno PEREIRA, Helder Girão</i>	
58	
PRELIMINARY ASSESSMENT OF THE BEHAVIOUR OF MATTRESSES AND ROCK DUMPING FOR SUBMARINE CABLE PROTECTION AT THE PORTUGUESE COAST	102
<i>Suha IBRAHIM, Filipe MIRANDA, Tiago FERRADOSA, Francisco TAVEIRA-PINTO, Paulo ROSA-SANTOS</i>	
18	
INTEGRATING NUMERICAL MODELING AND MACHINE LEARNING FOR COASTAL FLOOD PREDICTION AND BREAKWATER LAYOUT OPTIMIZATION	105
<i>Moeketsi DUIKER, Victor RAMOS, Jaime dos SANTOS CARDOSO, Francisco TAVEIRA-PINTO, Paulo ROSA-SANTOS</i>	
SERVIÇOS DE ECOSISTEMAS E RESILIÊNCIA COSTEIRA	109
57	
OS CURSOS TÉCNICOS DE DRAGAGENS COMO PLATAFORMA DE TRANSFERÊNCIA DE CONHECIMENTO PARA A GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS	111
<i>Maria Manuel CRUZ, Carlos COELHO, José L. CACHO, Luís M. PINHEIRO, Márcia LIMA, Paulo A. SILVA, Rui PAIVA</i>	
41	
MULTI-SCALE ASSESSMENT OF ECOSYSTEM SERVICES UNDER CLIMATE AND ANTHROPOGENIC PRESSURES ALONG THE NORTH WEST COAST OF PORTUGAL	114
<i>Jacinto CUNHA, Edna CABECINHA, Sebastian VILLASANTE, Stefano BALBI, Michael ELLIOTT, Sandra RAMOS</i>	
27	
COCREATED FUTURE SCENARIOS FOR WETLAND HABITAT RESTORATION IN A COASTAL LAGOON: INTEGRATING PARTICIPATORY MAPPING AND THE INVEST BLUE CARBON MODEL	117
<i>Lamara S. CAVALCANTE, Diógenes F. S. COSTA, Sebastian VILLASANTE, Ana I. SOUSA, João P. COELHO, Ana I. LILLEBØ</i>	
37	
CICLO URBANO DA ÁGUA E RESILIÊNCIA CLIMÁTICA EM GÂNDOLA, PORTUGAL - INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E SOCIAL ALINHADA COM A NATUREZA	118
<i>Alvarina PINTO SERRANO, Vera SIMÕES, Manuela MOREIRA DA SILVA</i>	
RECURSOS E SUSTENTABILIDADE COSTEIRA	121
43	
CONCEÇÃO DE UM ÍNDICE DE ADEQUABILIDADE PARA A AQUACULTURA OFFSHORE EM PORTUGAL	123
<i>Bárbara PEIXOTO, Daniel CLEMENTE, Cristiana COSTA, Filipe MIRANDA, Tiago FERRADOSA, Paulo ROSA-SANTOS, Francisco TAVEIRA-PINTO</i>	



14

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE MICROBIOLÓGICA E IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SENSÍVEIS NO ESTUÁRIO DO MONDEGO	126
---	-----

Ana Carla GARCIA, Bárbara CAMARÃO, Ana Cristina ROCHA

POSTERS	129
----------------------	-----

5

EVOLUÇÃO DA POSIÇÃO DA LINHA DE COSTA ENTRE O CABEDELLO E A LEIROSA (FIGUEIRA DA FOZ) À ESCALA DE DÉCADAS	131
---	-----

Paula FREIRE, Ana RILO, Filipa S. B. F. OLIVEIRA, Marta RODRIGUES, Alphonse NAHON, Neide AREIA, Pedro COSTA, Leandro BARROS

6

MODELLING MANGROVE COASTAL PROTECTION UNDER SEA-LEVEL RISE IN THE MACUSE ESTUARY	134
--	-----

Nélio SITOE, José PINHO

7

AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE AO GALGAMENTO DAS DUNAS NAS GARGANTAS NORTE E SUL DA PENINSULA DE MACANETA	136
--	-----

André António JOSÉ, Nélio N.O SITÓE, Fialho. P. J. NEHAMA, Noca B. FURACA, José PINHO

12

ATUALIZAÇÃO DA ANÁLISE DA EVOLUÇÃO TOPO-BATIMÉTRICA DA COVAGALA COM OS LEVANTAMENTOS COSMO DE 2025	138
--	-----

Filipa S. B. F. OLIVEIRA, Paula FREIRE, Marta RODRIGUES, Ana RILO, Alphonse NAHON, Neide AREIA, Pedro COSTA, José L. BARROS

15

MAPEAMENTO SEMIAUTOMÁTICO DE TSS COM IMAGENS SENTINEL-2 APLICADO A ESTUDOS COSTEIROS	141
--	-----

Pedro GONÇALVES, Sílvia NAVE

16

DÉFICE SEDIMENTAR E EROSÃO COSTEIRA EM PORTUGAL: ENQUADRAMENTO E DESAFIOS DE GESTÃO	144
---	-----

Sílvia NAVE, Pedro GONÇALVES

19

CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE À EROSÃO COSTEIRA COM APOIO MULTICRITÉRIO EM GRUPO: APLICAÇÃO DE UM NOVO MÉTODO EM MACEIÓ-AL	148
---	-----

Maria Alyne dos Santos LIMA, Wesley Douglas Oliveira SILVA, Andressa Ellen APOLINÁRIO, Iago José de Lima SILVA

21

MAPEAMENTO E ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA EM CONTEXTO INSULAR COM RECURSO A ÍNDICES MULTIESPECTRAIS: ESTUDO DE CASO NO ARQUIPÉLAGO DA MADEIRA	151
--	-----

Ana Cristina Freitas GOMES, Romeu GERARDO, Isabel Pedroso de LIMA



ÍNDICE

44	INUNDAÇÕES COSTEIRAS SOB CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO RIO TEJIPIÓ, PERNAMBUCO (BRASIL)	154
	<i>Yuri Tomaz NEVES, Italo Roberto O. NÓBREGA, Lysanne Souza de MOURA, Amanda Machado PEREIRA, Daniele de Souza SANTOS, Gadadhara de Figueiredo FERRAZ, Jaime Joaquim da Silva Pereira CABRAL</i>	
45	A IMPORTÂNCIA DOS REFERENCIAIS VERTICAIS EM ÁREA COSTEIRA DO BRASIL E IMPLICAÇÕES NA MODELAGEM HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL	157
	<i>Yuri Tomaz NEVES, Gastão Cerquinha da FONSECA NETO, Jaime Joaquim da Silva Pereira CABRAL</i>	
56	AMOSTRAGEM ADAPTATIVA COM AUVS USANDO DESCRITORES DE REGIMES DE TEMPERATURA NO CANHÃO DA NAZARÉ	160
	<i>Pedro Marques LOBÃO, João BORGES DE SOUSA, Renato MENDES</i>	
	ÍNDICE REMISSIVO	163



COMISSÕES

COMISSÃO CIENTÍFICA

Francisco Taveira Pinto
(FEUP)

Carlos Coelho
(Universidade de Aveiro)

Filipa Oliveira
(LNEC)

Ramiro Neves
(Instituto Superior Técnico)

José Pinho
(Universidade do Minho)

Marcia Lima
(Lusófona)

Rui Lança
(Universidade do Algarve)

Maria Vale
(DGT e CEATC – APRH)

José Maria Santos
(CEQAE)

Francisco Sancho
(LNEC)

José Antunes do Carmo (UCoimbra)

Juana Fortes
(LNEC)

Luísa Schmidt
(ICS/Ulisboa)

Óscar Ferreira
(UALG)

Teresa Fidélis
(UA)

Ana Matias
(UALg)

Rui Taborda
(ULisboa)

Francisco Campuzano
(CoLAB +ATLANTIC)

Lígia Pinto
(IST)

Diogo Mendes
(IST)

Anabela Oliveira
(IH)

Celso Pinto
(APA)

Graça Neves
(UNova)

COMISSÃO ORGANIZADORA INTERNACIONAL

Ana Carla Garcia
(APRH)

Carla Rolo Antunes
(APRH/UAlg)

Fernando Veloso Gomes (FEUP)

João Pedro Moura Castro Neves
(APDL)

Hugo Lopes
(APDL)

José Pimenta Machado (APAmbiente)

Kemal Vaz
(AMAIA)

Susana Montenegro
(ABRH)

António Pedro Pina
(ACRH)

COMISSÃO ORGANIZADORA LOCAL

Paulo Rosa-Santos
(APRH/FEUP)

Luciana das Neves
(FEUP)

Tiago Ferradosa
(FEUP)

Daniel Clemente
(FEUP)

Francisca Sarmento
(FEUP)

Filipe Miranda
(FEUP)

Ana Estêvão
(APRH)

André Cardoso
(APRH)

Conceição Martins
(APRH)



XII CPGZC

PLANEAMENTO E GESTÃO COSTEIRA



REVISITAR AS RECOMENDAÇÕES DO PROJETO EUROSION E INDICADORES ATUAIS NA EUROPA

Francisco TAVEIRA PINTO¹, Luciana das NEVES²

1. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, Porto, 4200-465, Portugal, fpinto@fe.up.pt

2. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, Porto, 4200-465, Portugal, lpneves@fe.up.pt

ENQUADRAMENTO

Os riscos associados à erosão costeira constituem um problema à escala europeia, reconhecido desde o início dos anos 2000 pelo projeto EUrosion (European Communities, 2006), desenvolvido por iniciativa do Parlamento Europeu e da Comissão Europeia, e corroborado por evidências mais recentes. No âmbito deste projeto, estimou-se que cerca de 20% da linha de costa europeia — aproximadamente 20 000 km — apresentava impactos significativos de erosão. Este valor mantém-se, de modo geral, consistente com as avaliações atuais, evidenciando a persistência do fenómeno. Nesta persistência observa-se, contudo, uma variabilidade espacial importante e, em diversas regiões, sinais de intensificação: cerca de 27% das zonas costeiras associadas a planícies aluvionares registam tendências erosivas superiores a 0,5 m/ano. Em paralelo, a subida do nível médio da água do mar e o aumento da frequência e da severidade de fenómenos extremos contribuem para o agravamento do risco costeiro, reforçando a probabilidade e a magnitude de episódios de inundação e de galgamento em horizontes temporais próximos, designadamente até 2050, segundo sínteses europeias recentes. A relevância do problema é agravada pela elevada exposição dos sistemas sociais e económicos, uma vez que é nas zonas costeiras que se concentra a maior parte da população e dos ativos económicos de grande valor, o que amplifica as consequências potenciais para as infraestruturas, as atividades económicas e os ecossistemas. Neste enquadramento, a erosão costeira deve ser encarada não apenas como um processo físico natural, mas também como um risco sistémico, decorrente da interação entre a ameaça, a exposição e a vulnerabilidade, em linha com os quadros conceptuais consolidados de avaliação do risco climático.

CONTRIBUTOS DO PROJETO EUROSION

Os contributos do projeto EUrosion permanecem relevantes, sobretudo na consolidação de uma leitura sistémica da erosão costeira, centrada na resiliência costeira, no balanço sedimentar e na unidade de análise e de gestão à escala da célula sedimentar. A resiliência costeira corresponde à capacidade intrínseca dos sistemas costeiros de acomodar mudanças — incluindo a subida do nível médio da água do mar, a ocorrência de eventos extremos e pressões de origem antropogénica — assegurando, a longo prazo, a manutenção das funções ecológicas, sociais e económicas. Esta capacidade depende de forma determinante da disponibilidade de sedimentos, em quantidade e qualidade adequadas, bem como da existência de espaço que permita a dinâmica natural da linha de costa. O balanço sedimentar assume, assim, um papel estruturante: considera-se positivo quando os fluxos de sedimentos — provenientes de fontes fluviais, da deriva litoral e de trocas transversais — compensam as perdas, quer naturais quer induzidas por ações humanas; pelo contrário, um défice sedimentar traduz-se num aumento da probabilidade de recuo da linha de costa, perda de habitats e intensificação da vulnerabilidade. Para operacionalizar esta abordagem, o projeto EUrosion propõe o conceito de célula sedimentar como unidade espacial de gestão, integrando fontes, processos de transporte e áreas de deposição, permitindo conceber intervenções coerentes com a dinâmica natural do sistema, em vez de respostas localizadas e fragmentadas.



DIAGNÓSTICO E CONCLUSÕES REVISITADAS

O diagnóstico do projeto EUrosion mantém-se, em larga medida, válido à luz do conhecimento e da evidência atuais. Em primeiro lugar, persiste o fenómeno de *coastal squeeze*, em que a urbanização e as infraestruturas comprimem os ecossistemas costeiros, limitando a sua capacidade de ajustamento, promovendo a perda de habitats e reduzindo a resiliência global. Em segundo lugar, o défice sedimentar continua a desempenhar um papel central, associado a intervenções na bacia hidrográfica e na faixa costeira — como barragens, dragagens e obras portuárias — que reduzem os fluxos sedimentares e alteram o transporte por corrente de deriva litoral, contribuindo para desequilíbrios morfodinâmicos persistentes. Em terceiro lugar, confirmam-se as limitações das medidas estruturais rígidas: esporões, quebra-mares e obras longitudinais aderentes podem gerar benefícios localizados no curto prazo, mas tendem a transferir o problema no espaço e no tempo, induzindo erosão a sotamar e reforçando a dependência de intervenções contínuas. Acrescem fragilidades institucionais e financeiras, nomeadamente a fragmentação de dados e a insuficiente integração dos impactos cumulativos e do risco costeiro na avaliação ambiental, o que compromete a tomada de decisões consistentes e comparáveis entre as regiões. Mantém-se, além disso, uma repartição assimétrica de custos, com o esforço financeiro a recair sobretudo sobre o sector público, apesar de muitas pressões resultarem de benefícios privados e de decisões de ocupação em áreas expostas.

RECOMENDAÇÕES DO EUROSION E SUA ATUALIDADE

As recomendações-chave do projecto EUrosion mantêm elevada pertinência e alinham-se com os princípios atualmente dominantes na adaptação aos riscos costeiros.

Em primeiro lugar, destaca-se a necessidade de restabelecer o balanço sedimentar e assegurar espaço para os processos naturais, através de uma gestão ativa de sedimentos, da recuperação de dunas e praias e da identificação de reservas estratégicas, complementadas, quando adequado, por medidas como o realinhamento planeado, que cria zonas de acomodação e reduz vulnerabilidades sistémicas a longo prazo.

Em segundo lugar, sublinha-se a importância de integrar explicitamente o risco e os custos no ordenamento do território e nas decisões de investimento, promovendo a internalização dos riscos, o reforço dos instrumentos de avaliação ambiental e uma repartição mais equilibrada de encargos, evitando a perpetuação de modelos de ocupação vulneráveis.

Em terceiro lugar, propõe-se a transição de respostas pontuais para estratégias planeadas, quantificáveis e avaliáveis, suportadas por Planos de Gestão de Sedimentos Costeiros e por análises custo-benefício em horizontes de várias décadas, em linha com práticas internacionais como as aplicadas nos *Shoreline Management Plans* e abordagens baseadas em opções (proteger, acomodar, recuar ou não intervir).

Por fim, atribui um papel central ao reforço do conhecimento e da gestão da informação, promovendo a harmonização de dados, a cartografia de risco e a disseminação de boas práticas, reconhecendo que a eficácia das políticas depende não só da engenharia e do planeamento, mas também da qualidade, da acessibilidade e da interoperabilidade da informação.

INDICADORES ACTUAIS E TENDÊNCIAS NA EUROPA

Os indicadores recentes confirmam a robustez das preocupações do projeto EUrosion, enquanto evidenciam um contexto de agravamento associado às alterações climáticas. As perdas anuais de território mantêm-se, globalmente, na mesma ordem de grandeza das estimativas clássicas, em torno de 15 km² por ano, sugerindo continuidade do problema à escala continental.



Em simultâneo, observa-se uma intensificação regional, com uma fração relevante de zonas costeiras, em particular em planícies aluvionares, a apresentar tendências erosivas elevadas, superiores a 0,5 m/ano. A pressão climática reforça esta trajetória: projeções apontam para perdas entre 1 400 e 2 500 km² até 2100, associadas ao recuo de praias arenosas, com variação dependente dos cenários e das incertezas inerentes à modelação numérica. Acresce que o risco costeiro resulta cada vez mais da combinação de erosão e inundação, num contexto em que a subida do nível médio da água do mar tende a aumentar a frequência de extremos, elevando a probabilidade de eventos historicamente raros nas próximas décadas.

Do ponto de vista económico, os custos de proteção e gestão tendem a agravar-se, embora análises recentes indiquem que, em áreas críticas e de elevado valor exposto, os investimentos em defesa costeira podem apresentar relações benefício-custo muito elevadas, sobretudo quando evitam danos por inundação. Este contexto tem acelerado uma mudança de paradigma na engenharia costeira, com maior valorização de estruturas híbridas e baseadas na natureza, integração com políticas públicas e de ordenamento, e adoção mais explícita de estratégias diferenciadas de gestão.

SÍNTESE CRÍTICA E CONCLUSÕES

A revisitação do projeto EUrosion evidencia uma forte continuidade conceptual, acompanhada de uma evolução prática relevante. O diagnóstico estrutural — marcado pelo défice sedimentar, pela pressão antrópica e pelas limitações das defesas rígidas — mantém-se válido, tendo o projeto EUrosion antecipado abordagens hoje amplamente reconhecidas, como as soluções baseadas na natureza, a gestão adaptativa e o planeamento de longo prazo orientado pelo risco. Contudo, os indicadores atuais mostram que a persistência do fenómeno se conjuga com tendências de agravamento, impulsionadas pelas alterações climáticas, o que torna mais exigente a passagem das orientações à sua efetiva implementação. Neste contexto, o desafio central é essencialmente operacional: traduzir princípios já consolidados em políticas integradas, verificáveis e sustentadas por dados robustos, enquadradas por mecanismos de governação claros e por instrumentos de financiamento e de repartição de custos coerentes. Em síntese, o conceito de conviver com a erosão, preconizado pelo projeto no início dos anos 2000, implica reconhecer o carácter dinâmico do litoral e gerir o risco de forma sistémica, conciliando resiliência ambiental, sustentabilidade socioeconómica e uma governação ajustada à escala dos sistemas sedimentares.

REFERÊNCIAS

European Communities. (2006). Viver com a erosão costeira na Europa – sedimentos e espaço para a sustentabilidade (P. Doody *et al.*, Eds.; versão portuguesa traduzida de Living with coastal erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability). Office for Official Publications of the European Communities.

Palavras-Chave: resiliência costeira; balanço sedimentar; célula sedimentar; soluções baseadas na natureza; gestão integrada das zonas costeiras.



ANÁLISE TEMPORAL DA EROSÃO NO ALGAR DE BENAGIL COM BASE EM MODELOS DIGITAIS DE ELEVADA PRECISÃO OBTIDOS POR LIDAR

Guilherme S. ROCHA¹, Cláudio SOUSA², Luís SOUSA³

1. LS Engenharia Geográfica, UAlg Tec Campus® - Gabinete nº 8 Universidade do Algarve, Campus da Penha, Estr. da Penha, 8005-139 Faro, guilherme.rocha@lsengenharia.pt

2. LS Engenharia Geográfica, UAlg Tec Campus® - Gabinete nº 8 Universidade do Algarve, Campus da Penha, Estr. da Penha, 8005-139 Faro, claudio.sousa@lsengenharia.pt

3. LS Engenharia Geográfica, UAlg Tec Campus® - Gabinete nº 8 Universidade do Algarve, Campus da Penha, Estr. da Penha, 8005-139 Faro, luis.sousa@lsengenharia.pt

ENQUADRAMENTO:

O Algar de Benagil, popularmente conhecido como Gruta de Benagil, localiza-se ao largo da Praia de Benagil, no concelho de Lagoa, distrito de Faro, sendo um dos mais emblemáticos geossítios costeiros do Algarve. Este local constitui um dos principais destinos turísticos da região, recebendo anualmente mais de um milhão de visitantes, impulsionados por atividades marítimo-turísticas promovidas por operadores locais.

Apesar da sua elevada relevância turística e económica, verifica-se uma carência significativa de informação técnica e científica atualizadas, relativamente à evolução geomorfológica da cavidade, ao seu estado de estabilidade estrutural e às condições de segurança para visitantes no interior da gruta. Até ao presente, não existiam programas estruturados de monitorização capazes de quantificar a evolução da erosão no interior do Algar de Benagil, nem estudos que permitissem definir a capacidade de carga turística, em termos de segurança.

Esta ausência de informação detalhada pode comprometer a gestão sustentável do geossítio, sobretudo num contexto de elevada pressão turística e de exposição a processos erosivos costeiros intensificados por eventos meteorológicos extremos como os evidenciados no início do ano de 2026, em Portugal.

OBJETIVOS:

- O presente trabalho tem como principal objetivo desenvolver e implementar um programa de monitorização geoespacial do Algar de Benagil com recurso a tecnologia LiDAR, visando compreender a segurança da atividade turística através das metas:
- Criação modelos digitais tridimensionais de elevada precisão (gémeos digitais);
- Análise a evolução temporal da morfologia interna da gruta;
- Identificação zonas de instabilidade estrutural e fraturação;
- Avaliação a dinâmica sedimentar da faixa de areia interior;
- Contribuir para a avaliação de risco e apoio à gestão sustentável do geossítio.

METODOLOGIA:

A metodologia adotada baseia-se na aquisição de dados tridimensionais obtidos através de levantamentos LiDAR realizados em campanhas temporais distintas.

Foram geradas duas nuvens de pontos de elevada densidade em diferentes (Outubro de 2024 e maio de 2026), para a construção de modelos digitais 3D da gruta.

Os modelos foram analisados através de técnicas de sobreposição e comparação multitemporal, possibilitando a deteção de alterações geométricas entre diferentes campanhas de aquisição. Esta abordagem permite identificar variações morfológicas associadas a processos erosivos, colapsos localizados e alterações na distribuição sedimentar.

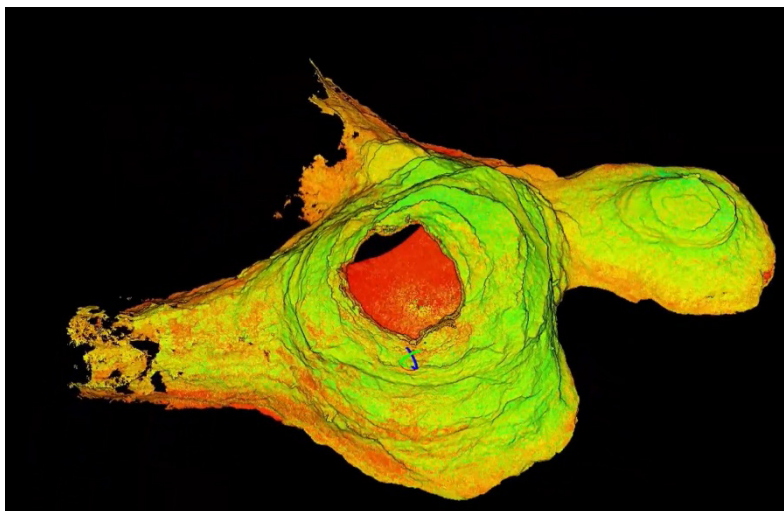
Adicionalmente, procedeu-se à análise das fraturas visíveis nas superfícies rochosas e à identificação de blocos potencialmente instáveis no teto da cavidade, com base na interpretação geométrica dos modelos digitais.

RESULTADOS PRELIMINARES:

Os resultados preliminares demonstram que a tecnologia LiDAR permite uma representação tridimensional altamente detalhada de ambientes subterrâneos e costeiros de elevada complexidade geomorfológica, como o Algar de Benagil, através da representação de nuvens de elevada densidade (neste caso, 274 milhões de pontos).

Observa-se um elevado potencial na identificação de variações estruturais e geométricas ao longo do tempo, permitindo a deteção de alterações associadas a processos erosivos e eventos de instabilidade, localizados através da medição das fraturas existentes, variação na volumetria da faixa de areia e presença de cicatrizes de desabamento na concavidade da gruta.

Os dados obtidos evidenciam ainda a importância da análise multitemporal para a compreensão da evolução da morfologia interna da gruta, particularmente em áreas sujeitas à ação combinada de erosão marinha, meteorização e pressão turística.



Nuvem de pontos 3D do Algar de Benagil composta por 274 milhões de pontos resultantes da primeira campanha de observação.

CONCLUSÕES:

O estudo demonstra o elevado potencial da tecnologia LiDAR e da modelação digital 3D na monitorização da dinâmica erosiva em ambientes costeiros de elevada complexidade, como o Algar de Benagil.

A abordagem multitemporal baseada em gémeos digitais constitui uma metodologia eficaz para a deteção de alterações geomorfológicas e para o apoio à gestão sustentável de geossítios turísticos.

Os resultados finais da comparação entre campanhas de monitorização serão apresentados no XII Congresso de Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras (XII CPGZC), permitindo uma análise aprofundada da evolução estrutural da gruta.

Palavras-Chave: LiDAR; Erosão Costeira; Monitorização Geoespacial; Algar de Benagil.



ONDE COMEÇA O MAR? GOVERNANÇA E PLANEAMENTO DO CONTÍNUO TERRA-MAR EM PORTUGAL

Nicolás SANTELICES ARTAZA & Paulo CONCEIÇÃO¹

1.FEUP - up201900109@fe.up.pt

RESUMO

Nas últimas décadas, o ordenamento do espaço marítimo (Marine Spatial Planning, MSP) consolidou-se como um instrumento central para a gestão das zonas marinhas, promovido como um mecanismo capaz de compatibilizar usos, reduzir conflitos e avançar no sentido de objetivos de sustentabilidade, num contexto de crescente intensificação das pressões antropogénicas sobre os ecossistemas marinhos (Ehler, 2021). No entanto, o desenvolvimento do MSP tem sido acompanhado por uma série de limitações estruturais, entre as quais se destaca a persistente separação conceptual, normativa e institucional em relação ao ordenamento do espaço marítimo e terrestre.

A literatura tem demonstrado que o planeamento terrestre e marítimo evoluíram historicamente como sistemas diferenciados, com quadros jurídicos, escalas de intervenção e culturas institucionais distintas, dando origem a formas de governança fragmentadas e a comunidades epistémicas que operam, em grande medida, de forma paralela (Walsh, 2021; Zaucha & Gee, 2019). Esta desconexão estrutural limita a capacidade de abordar de forma integrada os processos que atravessam a interface terra-mar, comprometendo a eficácia das políticas de gestão costeira e marinha.

Em resposta a estas limitações, surgiu um consenso crescente em torno da necessidade de superar a dicotomia terra-mar e avançar para abordagens integradas que concebam o espaço como um continuum socioecológico. Nesta perspetiva, os sistemas terrestres e marinhos são entendidos como interdependentes, articulando processos biofísicos (como fluxos de sedimentos e dinâmicas ecológicas), infraestruturas (portos, redes energéticas), práticas sociais (pesca, turismo) e quadros institucionais que operam de forma multiescalar (Zaucha & Gee, 2019; Walsh, 2021). No entanto, a tradução desta visão em práticas efetivas de planeamento e governação continua a ser um desafio significativo.

No contexto europeu, a Diretiva 2014/89/UE estabelece a necessidade de promover a coerência entre os instrumentos de planeamento terrestre e marítimo, reconhecendo explicitamente a importância das interações terra-mar (CE, 2014). No entanto, a sua implementação tem sido desigual entre os Estados-Membros, refletindo diferenças institucionais, administrativas e políticas.

Este artigo analisa criticamente estes desafios no caso de Portugal, um país com uma forte identidade marítima e um quadro institucional relativamente desenvolvido em matéria de MSP (Calado *et al.*, 2024). O objetivo é analisar em que medida os instrumentos e mecanismos existentes permitem — ou limitam — a integração efetiva do continuum terra-mar, considerando tanto as dimensões normativas como as práticas operacionais de planeamento.

Metodologicamente, o estudo baseia-se numa revisão bibliográfica e documental, complementada por 37 entrevistas semiestruturadas a atores-chave dos domínios científico, técnico e da administração pública. Esta abordagem permite analisar não só os instrumentos formais de planeamento, mas também as dinâmicas institucionais e operacionais que condicionam a sua implementação.



Os resultados evidenciam, em primeiro lugar, que Portugal registou avanços significativos na consolidação do MSP, apoiados num quadro legal que estabelece a necessidade de articulação com o planeamento territorial. Neste contexto, os Programas da Orla Costeira desempenham um papel particularmente relevante como instrumentos de articulação na interface terra-mar, ao integrarem dimensões ambientais, territoriais e de gestão de risco em espaços especialmente sensíveis da zona costeira.

Em segundo lugar, no entanto, persistem limitações importantes na articulação efetiva entre os sistemas de planeamento terrestre e marítimo. Estas manifestam-se na fragmentação institucional, na sobreposição de competências entre diferentes níveis administrativos e na ausência de mecanismos operacionais robustos de coordenação. Da mesma forma, identificam-se diferenças significativas nas lógicas, escalas e temporalidades do planeamento: enquanto o ordenamento do território terrestre se baseia em instrumentos consolidados e juridicamente vinculativos, a MSP tende a operar com abordagens mais estratégicas e setoriais, dificultando a sua integração.

Em terceiro lugar, o estudo demonstra que a integração do continuum terra-mar não pode ser entendida apenas como uma questão de coerência normativa, mas como a expressão de uma interdependência funcional e bidirecional entre os sistemas terrestres e marinhos. Evidências empíricas indicam que as interações terra-mar associadas a determinadas atividades marítimas, como a aquicultura ou a energia offshore, dependem diretamente de infraestruturas, serviços e cadeias logísticas localizadas em terra. Por sua vez, processos terrestres —como a gestão de bacias hidrográficas, a poluição difusa ou o transporte de sedimentos— condicionam de forma decisiva as dinâmicas ecológicas do meio marinho, configurando relações de dependência mútua que desafiam os limites tradicionais do planeamento setorial.

Com base nestes resultados, o artigo defende que o planeamento do continuum terra-mar deve ser entendido como um processo de governação relacional que transcende a mera coordenação formal entre instrumentos, exigindo mecanismos capazes de abordar a interdependência funcional, a multiescalabilidade e a diversidade dos atores envolvidos. Neste sentido, o estudo contribui para o debate sobre a governação costeira integrada, demonstrando que os desafios da integração são de natureza estrutural, e não apenas técnica ou administrativa.

Estes resultados têm implicações relevantes para Portugal e outros países de língua portuguesa, ao sublinharem a necessidade de reforçar a coerência entre políticas, promover abordagens multiescalares e avançar para modelos de planeamento mais integrados, coerentes e adaptativos na gestão das zonas costeiras e marinhas, especialmente num contexto de pressão crescente sobre os recursos e de expansão de novas atividades económicas no meio marinho

Palavras-Chave: Ordenamento do espaço marítimo, planeamento da zona costeira, interações terra-mar, governança multiescalar, Portugal.



POLÍTICAS PÚBLICAS E GOVERNAÇÃO DO RISCO COSTEIRO: A JUSTIÇA CLIMÁTICA NO PLANEAMENTO TERRITORIAL DO MUNICÍPIO DE OVAR.

Pedro Seixas SILVA¹, Myriam LOPES², Peter ROEBELING³

1. Universidade de Aveiro (Portugal). CESAM, Departamento de Ambiente e Ordenamento. pedro.seixas@ua.pt

2. Universidade de Aveiro (Portugal). CESAM, Departamento de Ambiente e Ordenamento. myr@ua.pt

3. Universidade de Aveiro (Portugal). CESAM, Departamento de Ambiente e Ordenamento. peter.roebeling@ua.pt

RESUMO

Num cenário de intensificação das alterações climáticas, o litoral arenoso português apresenta uma exposição crítica e crescente a riscos costeiros de índole biofísica, tais como a erosão costeira, os galgamentos oceânicos sistemáticos e a ocorrência de eventos meteorológicos extremos. A manifestação destes fenómenos traduz-se em impactos territoriais severos cujos custos ecológicos, económicos e sociais se distribuem de forma marcadamente desigual pelo território e pelas populações. Esta investigação, atualmente numa fase de desenvolvimento inicial, parte da premissa de que a gestão do risco e o planeamento territorial à escala local devem transcender a mera resposta técnica e de engenharia pesada. Assim, questiona-se em que medida as políticas públicas e a governação local destes riscos, especificamente no município de Ovar, integram de forma efetiva e estruturada os princípios fundamentais da justiça climática.

O objetivo central deste estudo consiste em analisar de forma holística a governação do risco costeiro sob o prisma de três dimensões analíticas essenciais: a justiça distributiva, a justiça procedimental e a justiça de reconhecimento. Pretende-se avaliar se as estratégias de adaptação vigentes respondem com eficácia às vulnerabilidades socioespaciais preexistentes ou se, por outro lado, tendem a perpetuar ou a acentuar as assimetrias e desigualdades sociais na região. O desenho empírico foca-se no município de Ovar, considerado um território crítico e emblemático no que concerne ao recuo acelerado da linha de costa, elegendo como áreas de intervenção prioritária as frentes urbanas de Esmoriz, Cortegaça, Maceda e Furadouro. Estas áreas concentram elevados níveis de exposição biofísica e uma forte pressão antrópica, configurando o cenário ideal para analisar como o perfil socioeconómico das comunidades e a sua localização geográfica condicionam a resiliência local e interagem com a eficácia dos investimentos em proteção da costa e ordenamento do território.

A abordagem metodológica adotada assenta numa estratégia mista e multidimensional. Numa primeira fase, procede-se à análise documental e de conteúdo dos principais instrumentos de planeamento territorial, ordenamento da orla costeira e planos municipais de proteção civil, procurando mapear a articulação institucional e a caracterização técnica das áreas vulneráveis. Numa fase subsequente, o estudo prevê a auscultação direta das comunidades locais através da recolha e análise qualitativa e quantitativa das suas perceções. Esta etapa incidirá especificamente sobre o nível de acesso à informação pública, os mecanismos reais de participação nos processos de tomada de decisão e a eficácia da resposta institucional.

Tomando os episódios de tempestades e galgamentos ocorridos nos meses de janeiro e fevereiro de 2026 como referencial empírico e analítico, a investigação explora a hipótese de que a perceção da justiça climática varia significativamente entre os diferentes estratos e grupos que compõem o tecido social de Ovar. Esta variação reflete-se de modo distinto nas fases que antecedem, coexistem e sucedem o evento extremo, revelando vulnerabilidades e assimetrias na capacidade de recuperação socioeconómica. Com este trabalho, pretende-se robustecer o debate académico e político sobre a adaptação climática costeira, fornecendo dados científicos que promovam modelos de governança e políticas públicas que sejam, efetivamente, mais inclusivos, equitativos e resilientes.

Palavras-Chave: Justiça Climática; Riscos Costeiros; Vulnerabilidade Social; Adaptação; Governação Territorial



XII CPGZC

MORFODINÂMICA COSTEIRA E ESTUARINA



EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DO LITORAL DA REGIÃO CENTRO DE PORTUGAL (2018-2025): ESMORIZ- FURADOURO, SÃO JACINTO E COSTA NOVA-VAGUEIRA

Ana Margarida FERREIRA¹, Carlos COELHO¹, Paulo A. SILVA²

1. CERIS & Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, margarida.ferreira@ua.pt; ccoelho@ua.pt

2. CESAM & Departamento de Física, Universidade de Aveiro, psilva@ua.pt

INTRODUÇÃO

A região centro de Portugal continental apresenta, historicamente, problemas de erosão costeira associados a défices sedimentares induzidos por atividades antropogénicas (Santos *et al.*, 2014). Pela magnitude das taxas de recuo da linha de costa e pela presença de aglomerados populacionais nestes territórios, o litoral de Ovar e o setor a sotamar do Porto de Aveiro constituem duas das áreas costeiras de maior preocupação para a gestão costeira, onde têm sido realizadas diversas intervenções com o objetivo de proteger pessoas e bens (Santos *et al.*, 2014). A análise das intervenções realizadas desde a década de 1970 evidencia políticas de gestão diferenciadas. Em Ovar, as intervenções centraram-se sobretudo na proteção através da construção de estruturas costeiras (obras longitudinais aderentes e esporões). A sotamar do Porto de Aveiro, a política de gestão na década de 1970 baseou-se na construção de estruturas (obras longitudinais aderentes e esporões), contudo, a partir da década de 1990, as alimentações artificiais de sedimentos a passaram a ser a principal intervenção, fazendo uso dos volumes de sedimentos dragados pelo Porto de Aveiro. Desde esta data, ao longo do tempo, entre a Costa Nova e a Vagueira, foram depositados vários milhões de metros cúbicos de sedimentos com o objetivo de mitigar o défice sedimentar instalado. Em termos de volume, a maior intervenção foi realizada em 2020, com a deposição de aproximadamente $2.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ na zona submersa da praia (Pinto *et al.*, 2022).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a evolução morfológica do litoral de Ovar (Esmoriz-Furadouro) e dois setores, um a barlamar e outro a sotamar do Porto de Aveiro (São Jacinto e Costa Nova-Vagueira, respetivamente), Figura 1. A análise focou-se na variação de volumes de sedimento e na evolução da posição da linha de costa e do pé da duna, do lado de mar, por comparação de levantamentos da zona submersa e emersa (praia e duna), realizados no período 2018-2025.

METODOLOGIA

A análise foi concretizada com base nos levantamentos disponibilizados pelo programa COSMO (2026), através da aplicação de ferramentas de geoprocessamento do *software* QGIS. A Tabela 1 apresenta os levantamentos considerados na análise que cobrem o período de 2018 a 2025 (7 anos). As variações de volumes no domínio de estudo foram quantificadas em relação ao levantamento de 2018, permitindo auxiliar a avaliação de tendências de médio/longo prazo. Para esta análise, dividiu-se cada um dos setores costeiros analisados em trechos costeiros com cerca de 700 a 1000 m de extensão, sendo quantificado para cada trecho a variação de volume no domínio, considerando diferentes intervalos altimétricos (Figura 1).

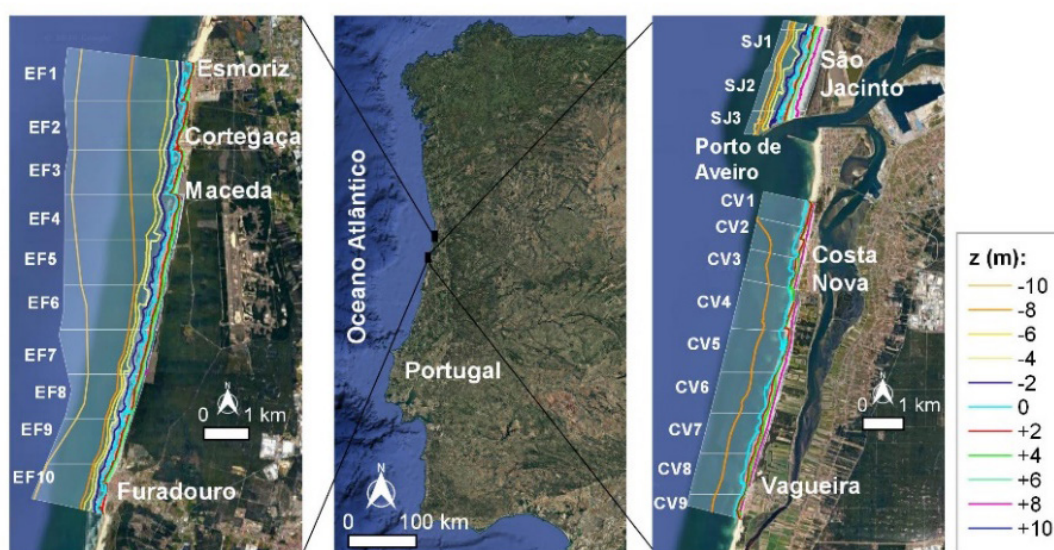


Figura 1. Áreas de estudo, com identificação da divisão em trechos costeiros e intervalos altimétricos: Esmoriz-Furadouro (esquerda); São Jacinto e Costa Nova-Vagueira (direita).

Tabela 1. Levantamentos topo-batimétricos disponibilizados no âmbito do programa COSMO (2026).

Sector Costeiro	Esmoriz-Furadouro (10.3 km)	São Jacinto (2.2 km)	Costa Nova-Vagueira (8 km)
Levantamentos	Agosto de 2018; Junho de 2019; Julho de 2020; Setembro de 2025	Julho de 2018; Junho de 2019; Junho de 2020; Novembro de 2025	Julho de 2018; Junho de 2019; Junho de 2020; Março de 2021; Maio de 2024; Novembro de 2025

RESULTADOS

A Figura 2 apresenta os resultados do balanço sedimentar nos setores costeiros estudados, para diferentes horizontes temporais, tendo como referência o ano de 2018. No setor Esmoriz-Furadouro (Figura 2a) observa-se uma tendência erosiva ao longo do período estudado. A análise da variação volumétrica ao longo do setor mostra que esse processo é mais intenso e progressivo nos trechos não intervencionados por obras de defesa costeira (EF5 a EF9, Figura 1). Adicionalmente, os resultados indicam que as maiores variações volumétricas ocorrem nas cotas mais elevadas, correspondentes à zona emersa da praia. Em São Jacinto, após um período de balanço sedimentar negativo (2019-2018), o setor apresenta uma tendência de acumulação, registando-se um ganho sedimentar superior a $1.7 \times 10^6 \text{ m}^3$, no período entre 2018 e 2025 (Figura 2b).

No setor Costa Nova-Vagueira, verifica-se um défice sedimentar generalizado nos períodos 2018-2019 e 2018-2020 (Figura 2c) que induziu recuo da posição da linha de costa. A partir de 2021 observa-se uma inversão desta tendência, passando o setor a apresentar um balanço positivo da ordem dos $2.16 \times 10^6 \text{ m}^3$. Este comportamento é consistente com o histórico de intervenções de alimentação artificial de sedimentos realizadas na Costa Nova, nomeadamente a alimentação de elevada magnitude realizada em 2020 e intervenções subsequentes, realizadas no período de 2020 a 2025. No ano subsequente à intervenção de 2020 registam-se ganhos significativos de volume de sedimentos na zona de deposição, sobretudo nas cotas de maior profundidade e erosão a sotamar, com recuo da posição da linha de costa. A comparação entre os levantamentos de 2018-2024 e 2018-2025 sugere que os sedimentos depositados foram redistribuídos transversalmente e ao longo da área de estudo, promovendo avanço da posição da linha de costa e do pé da duna em direção ao mar, nos trechos a sotamar do local de deposição.

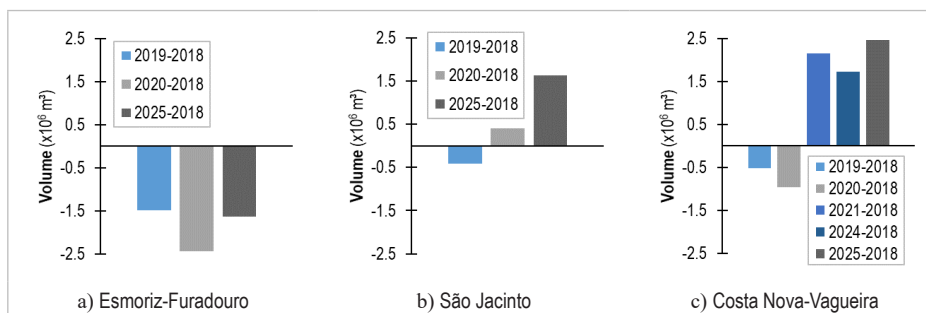


Figura 2. Balanço de volume de sedimentos na totalidade dos setores costeiros.

CONCLUSÃO

A análise realizada mostra evoluções distintas no balanço sedimentar dos três setores costeiros estudados no período 2018-2025, com erosão no setor Esmoriz-Furadouro e acumulação de sedimentos a barlavento do quebra-mar portuário (São Jacinto) e na Costa Nova-Vagueira, onde se realizaram alimentações artificiais de sedimentos. Estes resultados evidenciam impactos associados às diferentes opções de intervenção no litoral, facilitando o apoio à gestão costeira.

REFERÊNCIAS

- COSMO (2026). Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental: COSMO, APA - Agência Portuguesa do Ambiente (<https://cosmo.apambiente.pt/> - última consulta: março de 2026).
- Pinto, C., Taborda, R., Andrade, C., Baptista, P., Silva, P. A., Mendes, D., & Pais Barbosa, J. (2022). Morphological development and behaviour of a shoreface nourishment in the Portuguese western coast. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(2).
- Santos, F., Lopes, A., Moniz, G., Ramos, L., & Taborda, R. (2014). Gestão da zona costeira: o desafio da mudança. Relatório do Grupo de Trabalho do Litoral, 237 p.

Palavras-Chave: dinâmica costeira; balanço sedimentar; gestão costeira; monitorização; alimentação artificial



MEDIUM-TERM MORPHOLOGICAL EVOLUTION OF THE DOURO SAND SPIT FOLLOWING BREAKWATER CONSTRUCTION

Mahmoud ABOUHALIMA^{1,2}, Luciana das NEVES^{1,2,3}, Hugo LOPES⁴, Francisco TAVEIRA-PINTO^{1,2}, Paulo ROSA-SANTOS^{1,2}

¹ Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal; up202204080@up.pt, lpneves@fe.up.pt, fpinto@fe.up.pt, pjrsantos@fe.up.pt

² CIIMAR - Interdisciplinary Centre of Marine and Environmental Research, Portugal

³ IMDC, Belgium

⁴ APDL - Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A; hugo.lobes@apdl.pt

INTRODUCTION

The Douro sand spit is located at the mouth of the Douro River between Porto and Vila Nova de Gaia. It has historically been affected by energetic Atlantic wave conditions, variable river discharges and repeated engineering interventions. Between 2004 and 2008, a 350 m extension of the northern jetty and a 450 m curved breakwater were constructed to improve navigation, reduce wave penetration and limit dredging needs.

This study gives attention to the medium term behavior of the sand spit after the completion of the breakwater. In particular, the coupled evolution of sediment volume, shoreline position, dune-crest migration and localised erosion/accretion patterns, which remain important aspects for assessing the resilience of this engineered coastal system. The analysis uses a monitoring dataset of 39 topographic surveys from 2008 to 2025. The post-2008 period was selected because the breakwater altered the local hydrodynamic setting and shifted the sand-spit response from earlier longitudinal growth toward a wider, more seaward accretion pattern. Several studies examined the Douro sand spit system both before and after the break water construction, such as Bastos *et al.* (2012) and Bio *et al.* (2023). While some of the conclusions are shared, we give an in depth analysis of the morphology of the sand spit in recent years.

METHODS

The morphological assessment combined integral, line-based and spatial-statistical analyses. The total sand-spit area and volume were calculated directly from each digital elevation model (DEM). Shoreline position was extracted by defining the sea boundary and offsetting points toward the 2 m elevation contour, taken as the mean sea-level reference. The dune crest was identified from changes in slope and verified using local elevation maxima.

Difference of DEMs (DoD) was used to map elevation changes between consecutive surveys. Positive and negative values indicate accretion and erosion, respectively. To distinguish systematic spatial patterns from isolated changes, Getis-Ord Gi* hotspot analysis was applied to selected accretional and erosional periods. Statistically significant hotspots identify clustered accretion, while cold spots identify clustered erosion. This combination provides volumetric trends and spatial interpretation of the processes controlling the spit.

RESULTS AND DISCUSSION

The post-breakwater period is characterised by a dominant accretional trend, Figure 1. From 2008 to 2025, the spit gained on average more than 57,000 m³ of sediment and more than 9,000 m² of

area per year. Total area and volume are strongly correlated ($r = 0.979$), indicating that the expansion of the spit is associated with a consistent increase in sediment stock. Nevertheless, the time series includes several erosional episodes. The largest absolute losses occurred between September 2017 and April 2018, with approximately 68,000 m³ removed, and between September 2013 and March 2014, with approximately 65,000 m³ removed. Despite these losses, the spit showed rapid recovery. The 2013-2014 erosion was fully recovered within 79 days. Most other erosional events recovered within three to ten months, suggesting that sediment supply and post-storm reworking are sufficient to maintain the net accretional trajectory.

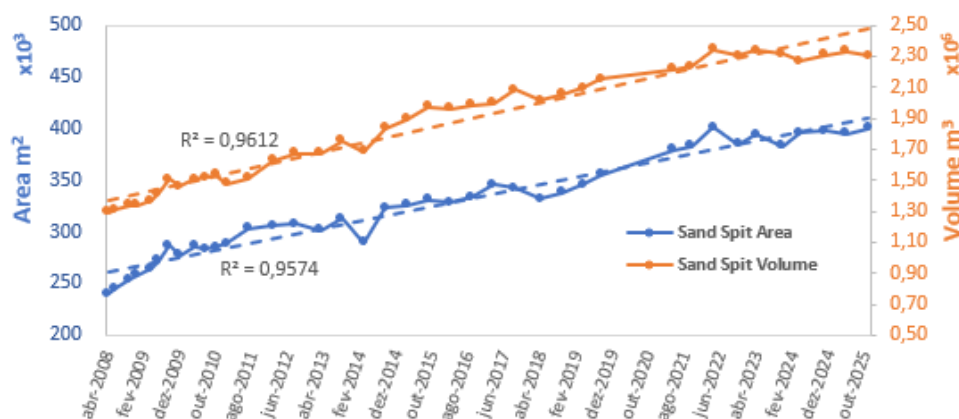


Figure 1. Timeseries of total area and volume observed since the construction of the breakwater.

The DoD and hotspot analyses, Figure 2, show that accretion and erosion are spatially organised. During strongly accretional periods, deposition clustered along the foreshore and seaward margin. During erosional periods, particularly September 2013-March 2014 and September 2017-April 2018, erosion was concentrated in the southern sector, which is more directly exposed to wave attack. In contrast, the northern sector often continued to accumulate sediment, likely due to partial sheltering, wave diffraction and energy dissipation associated with the breakwater and ebb-tidal morphology.

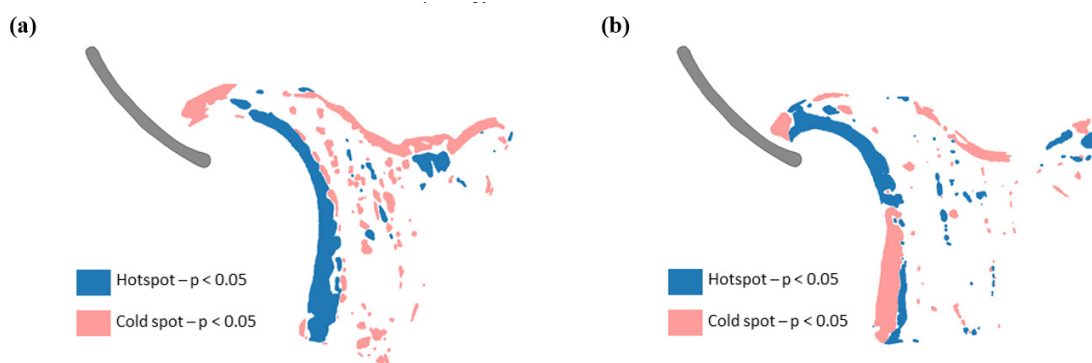


Figure 2. Hotspot analysis of the same period showing locations of change with 95% confidence. (a) Typical accretional period. (b) Typical erosional period.

Cross-shore and planform analyses, Figure 3, further reveal different rates of shoreline and dune-crest adjustment. At the mid-section, the shoreline advanced seaward by approximately 160 m between 2008 and 2025, reflecting steady sediment deposition in the nearshore. The dune crest also migrated seaward, but in a stepwise manner, advancing by more than 125 m by the end of the study period. Unlike the shoreline, which progressed relatively smoothly with temporary retreats, the crest remained nearly stationary for several years before abrupt seaward shifts. Crest elevation remained comparatively stable, mostly within 8.5-9.5 m, suggesting that dune development occurred mainly through horizontal widening and crest migration rather than continuous vertical growth.



CONCLUSIONS

The Douro sand spit has evolved as a dynamically stable and resilient coastal landform since the completion of the breakwater. The system remains strongly accretional at the medium-term scale, despite repeated storm-induced erosion. The results also show that shoreline and dune-crest evolution are coupled but asynchronous. Shoreline advance is comparatively gradual and marine-driven, whereas dune-crest migration occurs in discrete steps, probably controlled by thresholds in sediment availability, wind transport and vegetation-related stabilization. For management, these findings highlight the value of sustained topographic monitoring and spatial-statistical analysis for evaluating the performance of coastal engineering interventions. The Douro sand spit demonstrates that engineered estuarine systems can maintain a net accretional and self-recovering behaviour.

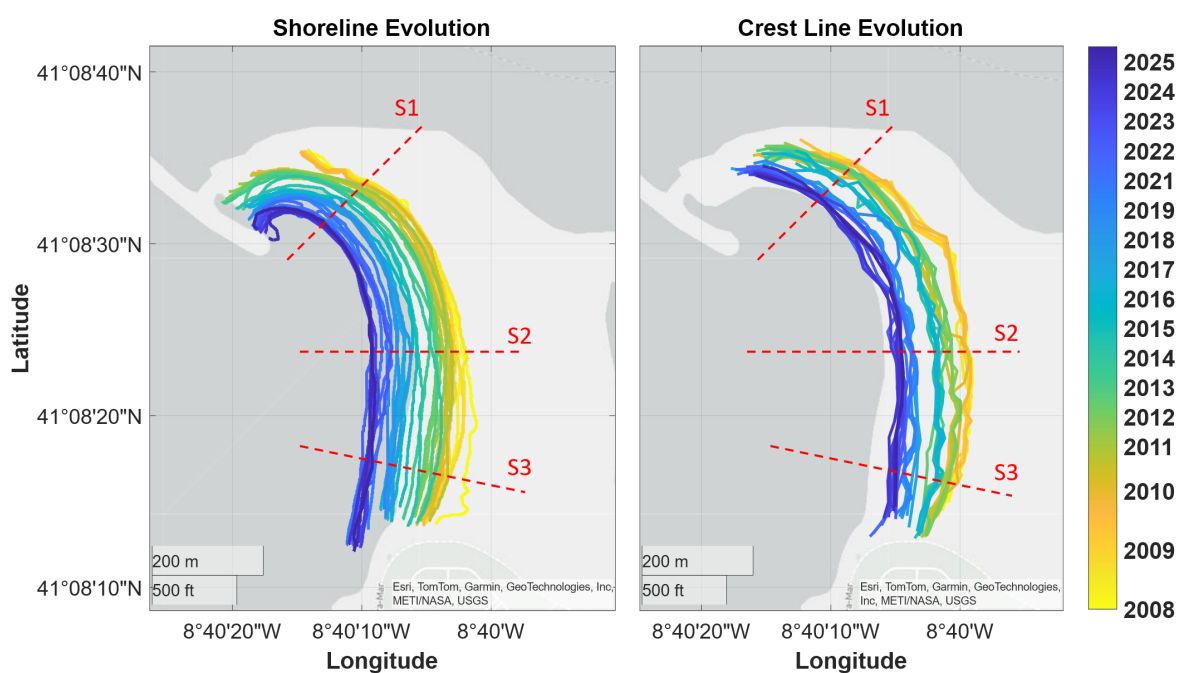


Figure 3. Aerial illustration of post-breakwater construction of (a) shoreline evolution, and (b) crest position evolution.

ACKNOWLEDGEMENTS

The first author acknowledges the PhD scholarship funded by the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT), reference 2024.06228.BD. The authors acknowledge APDL - Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A. for providing the topographic survey data, and DuneFront project members for technical discussions. The DuneFront Project is funded by the European Union's Horizon Europe research and innovation programme under Grant Agreement No. 101135410.

Keywords: Sand spit; Coastal Morphodynamics; Shoreline evolution; Dune crest; Hotspot analysis.



INTERVENÇÕES DE ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DE SEDIMENTOS: AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO MODELO IODA

Catarina CARVALHO¹, Ana Margarida FERREIRA², Carlos COELHO²

1. Departamento de Física, Universidade de Aveiro, catarinaocarvalho@ua.pt

2. CERIS & Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, margarida.ferreira@ua.pt; ccoelho@ua.pt

INTRODUÇÃO

As zonas costeiras apresentam tendências crescentes de erosão, frequentemente associadas a balanços sedimentares negativos. A alimentação artificial de sedimentos é uma medida de mitigação de défices sedimentares, através da introdução de sedimentos no sistema costeiro. Após a deposição, esses sedimentos são distribuídos pela ação combinada de processos de transporte sedimentar longitudinal e transversal, consoante o local de deposição (em perfil e em planta). Neste trabalho, considerando um domínio genérico de simulação, com recurso ao modelo numérico IODA, analisou-se a distribuição espaçotemporal dos sedimentos após diferentes cenários de intervenção de alimentação artificial, numa perspetiva de médio a longo prazo. Avaliaram-se os efeitos na largura da berma da praia e no volume de duna erodido, discutindo diferentes locais de depósito, sob várias condições de défice sedimentar longitudinal.

METODOLOGIA

O modelo IODA – *Integrated Coastal Dynamics Assessment* combina os modelos LTC e CS-Model numa rotina cíclica, executada a cada *time-step* (Ferreira *et al.*, 2026). O LTC é um modelo de uma linha, que aplica a equação de continuidade para determinar a evolução da posição da linha de costa a partir dos gradientes de transporte longitudinal de sedimentos entre segmentos consecutivos do domínio costeiro (Coelho, 2005). O CS-Model simula os processos que governam a evolução do perfil de praia em escalas temporais de médio a longo prazo, considerando as transferências entre a barra e a berma, a erosão dunar e o transporte sedimentar eólico (Larson *et al.*, 2016).

O IODA foi aplicado para simular o período de um ano, com *time-step* de 3 h. O domínio espacial é genérico, com batimetria regular e paralela (5 000 x 2 000 m²), composta por 21 perfis transversais iguais e uniformemente espaçados. No cenário de referência (C_R) regista-se erosão dunar por ação direta da ondulação (Figura 1a). O C_R foi definido de forma a isolar os processos transversais e avaliar exclusivamente a transferência de sedimentos da duna para a berma. Para tal, o transporte sedimentar eólico foi considerado nulo, calibrou-se o volume da barra submersa para corresponder ao estado de equilíbrio com a agitação marítima e a altura da duna foi estabelecida de forma a não se registarem galgamentos. Foram realizados estudos preliminares para avaliar diferentes tipologias de intervenção no perfil transversal, tais como, elevação da berma, reforço dunar, aumento do volume da barra submersa e alargamento da berma. Neste trabalho apresentam-se apenas os resultados relativos ao alargamento da berma, no qual a distribuição dos sedimentos diminui progressivamente ao longo do perfil, desde um valor máximo na crista da berma até nulo na profundidade de fecho (Figura 1b).



2. MORFODINÂMICA COSTEIRA E ESTUARINA

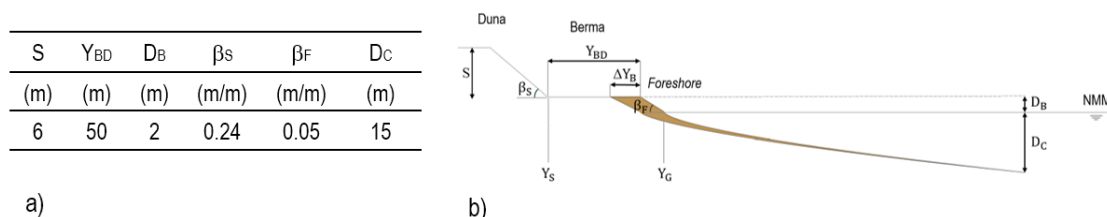


Figura 1: Perfil transversal: a) Características morfológicas no cenário de referência (CR); b) Cenário de intervenção (NMM – nível médio do mar).

Definiram-se seis cenários com igual volume de deposição de sedimentos ($90\,720\text{ m}^3$), distribuídos ao longo de todo o domínio, nas metades norte e sul, e nos terços norte, centro e sul. Para simular o défice sedimentar longitudinal, foram impostas taxas de redução no volume de entrada de sedimentos na fronteira norte de 0%, 10%, 20%, 30% e 40% (K_{Bound} igual a 1.0, 0.9, 0.8, 0.7 e 0.6, respetivamente). O clima de agitação marítima foi constante, de elevada energia, com ondas regulares de altura ao largo de 3 m, período de 10.55 s e direção de 80° (em relação à linha de costa, no sentido anti-horário).

RESULTADOS

A Figura 2 apresenta os resultados da implementação das intervenções. Apesar da berma da praia beneficiar dos sedimentos erodidos da duna, o efeito do défice de transporte sedimentar longitudinal supera essa contribuição. Assim, os cenários com maior défice sedimentar longitudinal na fronteira norte apresentam maior erosão dunar e menor área de berma.

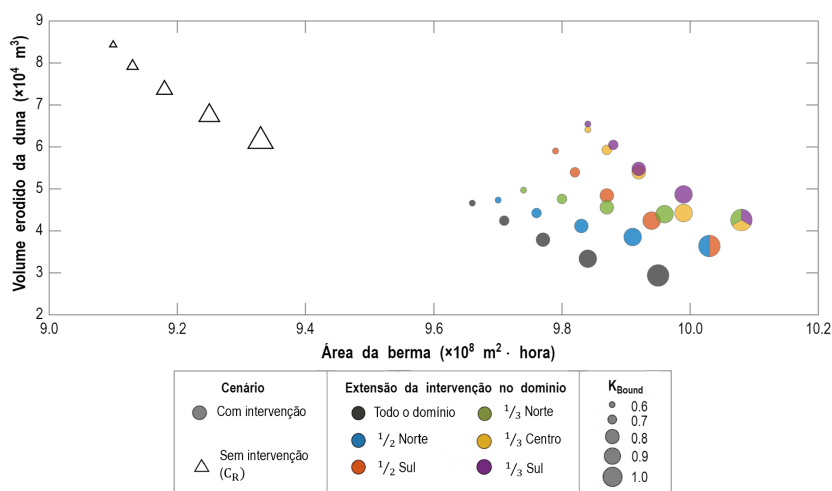


Figura 2: Volume erodido da duna e área da berma acumulada no tempo, em função das taxas de redução no volume sedimentar de entrada no domínio.

A intensidade dos efeitos do défice sedimentar longitudinal varia ao longo do domínio, sendo superior na zona próxima da fronteira norte, diminuindo progressivamente para sotamar. Desta forma, as intervenções a norte apresentam uma maior capacidade de mitigar a erosão dunar, sobretudo em condições de elevado gradiente longitudinal, porque atuam na zona de maior erosão. Aumentar a disponibilidade de sedimentos no setor norte, reforça a largura da berma, o que reduz o impacto da onda na duna. A alimentação em todo o domínio apresenta os melhores resultados na redução da erosão dunar, mas conduz aos menores ganhos na área útil da praia (largura da berma, no tempo). Quando o objetivo é maximizar a área da berma, a melhor localização para o depósito dos sedimentos depende dos níveis de défice sedimentar a norte. Em condições de maior défice longitudinal, as intervenções na metade sul e nos terços sul e centro favorecem maiores áreas da berma, uma vez que são realizadas nas zonas de menor gradiente longitudinal, permitindo que o volume de sedimentos permaneça no local de depósito durante mais tempo. Em situações de



menor déficit sedimentar longitudinal ($K_{\text{Bound}} \geq 0.8$), as intervenções distribuídas por terços, incluindo o terço norte, resultam numa maior área de berma, do que intervir na metade sul.

CONCLUSÃO

A aplicação do modelo IODA a um domínio costeiro genérico demonstrou que as intervenções de alimentação artificial de sedimentos requerem uma definição clara dos seus objetivos a médio e longo prazo, uma vez que se verificam diferenças entre estratégias orientadas para a mitigação da erosão dunar e para o aumento da área útil de praia. O desempenho da intervenção depende da localização da alimentação e do déficit longitudinal a que o sistema está sujeito.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela FCT, Grant UID/6438/2025 da unidade de investigação CERIS.

REFERÊNCIAS

Coelho, C. (2005); Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira, Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.

Ferreira, A. M., Coelho, C. & Silva, P. A. (2026); Beach-dune system evolution under the combined effects of cross-shore and longshore sediment transport processes (pp. 16-22).

Larson, M., Palalane, J., Fredriksson, C., Hanson, H. (2016); Simulating cross-shore material exchange at decadal scale. Theory and model component validation.

Palavras-Chave: alimentação artificial; morfologia costeira; IODA; modelação numérica; gestão costeira.

EFEITO DO TRANSPORTE SEDIMENTAR EÓLICO EM ESTRUTURAS DE ACESSO A PRAIAS

Frederico ROMÃO¹, Fabiana CORREIA², Paulo SILVA², Márcia LIMA^{1,3}, Susana COSTAS⁴, Carlos COELHO¹

1. CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, Aveiro, 3810-193, Portugal, fredericoromao@ua.pt, ccoelho@ua.pt, marcia.lima@ua.pt

2. CESAM, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193, Portugal, psilva@ua.pt

3. Centro Universitário do Porto (CUP), FCNET, Universidade Lusófona, 4000-098, Porto, Portugal, marcia.lima@ulusofona.pt

4. CIMA/ARNET, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, Faro, 8005-139, Portugal, scotero@ualg.pt

INTRODUÇÃO

O transporte sedimentar eólico é um dos principais processos responsáveis pelo desenvolvimento e evolução das dunas, morfologias importantes na resiliência costeira (Vos *et al.*, 2024). Os padrões do vento influenciam diretamente o transporte sedimentar eólico, com impacto sobre infraestruturas costeiras, nomeadamente nos passadiços de acesso pedonal às praias (Pourteimouri *et al.*, 2022). Como barreira ao transporte sedimentar eólico, os passadiços podem promover a deposição de sedimentos ou, inversamente, induzir erosão localizada. Deste modo, é conveniente conhecer os padrões de transporte sedimentar eólico para avaliar o potencial de deposição/erosão junto aos passadiços e garantir o seu funcionamento adequado. Neste trabalho, descrevem-se e apresentam-se os resultados de diferentes campanhas de monitorização do transporte sedimentar eólico, avaliando a sua relação com os registos de ventos medidos no local e com o comportamento de deposição/erosão verificado nos passadiços de acesso à praia.

METODOLOGIA

A medição do transporte sedimentar eólico foi efetuada ao longo de oito campanhas (CN1 a CN8: 20/11/2025, 16/12/2025, 14/01/2026, 04/02/2026, 20/02/2026, 04/03/2026, 12/03/2026 e 25/03/2026, respetivamente) na praia da Costa Nova, Aveiro, Portugal, recorrendo a armadilhas de sedimento (Figura 1). Para quantificar a deposição de sedimentos, foram utilizadas caixas cúbicas com 15 cm de lado, posicionadas em dois locais da praia (C2 e C4), de acordo com a direção predominante do vento. Em cada campanha, as características do vento foram medidas através de um anemómetro de copos instalado a 80 cm de altura (durante cerca de 1h:40min). Adicionalmente, foram recolhidas amostras de sedimento para determinar parâmetros como a humidade, salinidade e d₅₀ dos sedimentos, e feitas medições da largura da praia, fatores que influenciam o transporte sedimentar eólico, alvos de análise noutros trabalhos.

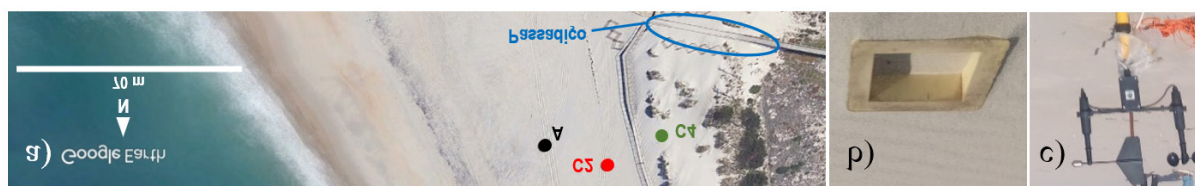


Figura 1 – Zona de estudo, praia da Costa Nova: a) passadiço de acesso à praia e posição dos equipamentos na praia; b) armadilhas de caixa (C2 e C4); e c) anemómetro de copos (A).

O passadiço de acesso à praia está normalmente desimpedido, mas em certas ocasiões, o intenso transporte sedimentar eólico cobre-o com areia. Atualmente, o passadiço de acesso pedonal à

praia (Figura 2) encontra-se em certas zonas, colmatado com sedimentos transportados pelo vento, chegando a atingir cotas superiores à do corrimão (> 95 cm).

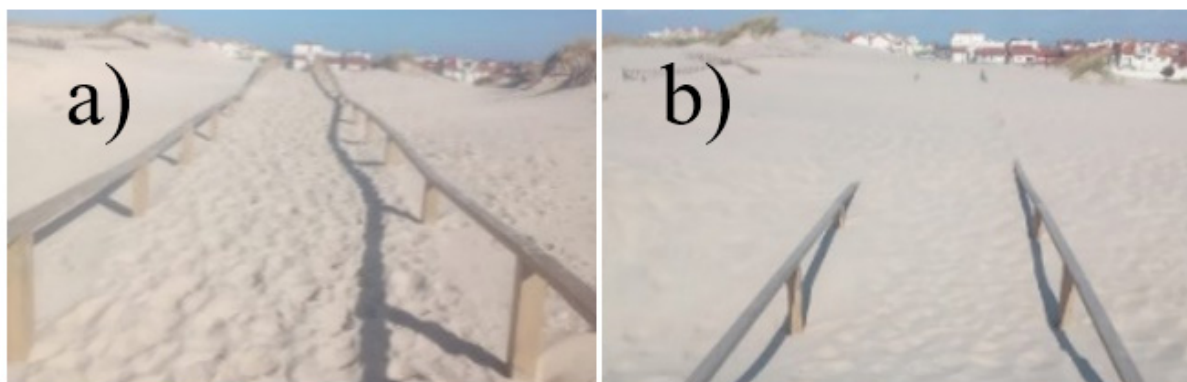


Figura 2 – Passadiço de acesso à praia da Costa Nova: a) dia 20/02/2026; e b) dia 12/04/2026.

RESULTADOS

Os resultados do transporte sedimentar eólico, estimados com base nas caixas C2 e C4, encontram-se representados na Figura 3a, por relação com as velocidades médias do vento, medidas em campo. Foram registados valores de transporte nas campanhas CN1, CN2 e CN8. Verificou-se que a caixa localizada na alta praia (C2) recolheu maiores quantidades de sedimento do que a caixa situada na duna (C4), estando esta armadilha localizada numa depressão, protegida pela própria duna da ação direta dos ventos de N e NW (ventos dominantes, Figura 3b). A rosa de rumos representada na Figura 3b, considera registos de 30 anos (1996-2025), da base de dados de reanálise do ERA5, obtidos a 10 m de altura. De um modo geral, o transporte sedimentar eólico aumenta com a intensidade da velocidade do vento. A campanha CN2 foi a que registou ventos de maior intensidade, com valores médios de 10.67 m/s, medidos no anemómetro de copos, resultando em valores de transporte sedimentar eólico de 25.26 g/m/s medidos em C2 e 8.76 g/m/s medidos em C4. Apesar da diferença de local e altura, as velocidades médias do vento registadas durante as campanhas foram comparadas com a base de dados do ERA5, encontrando-se representados na Figura 3c, verificando-se uma boa concordância entre registos.

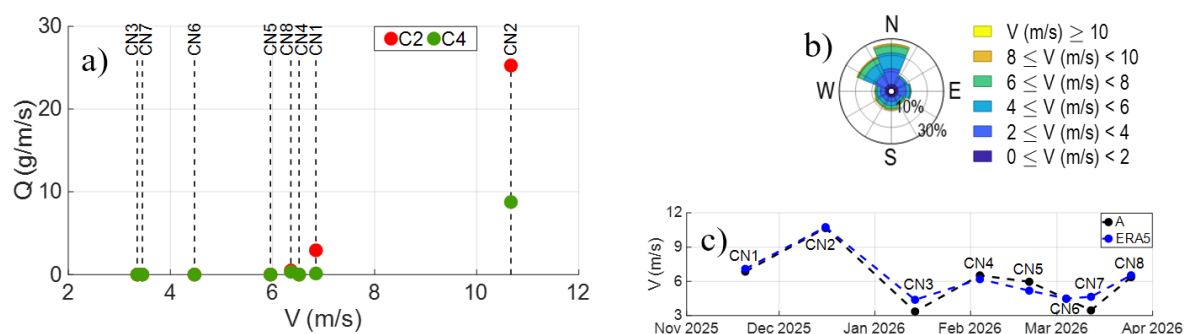


Figura 3 – Transporte sedimentar eólico e registos de vento: a) relação entre o transporte sedimentar eólico (Q , g/m/s) e a velocidade do vento (V , m/s), por caixa e por campanha; b) rosa de rumos, com intensidade e direção do vento em 30 anos (ERA5, entre 1996 e 2025); e c) velocidade média do vento (V , m/s) ao longo das diferentes campanhas, no anemómetro de copos (A) e na base de dados de reanálise (ERA5).

Tipicamente, para a costa noroeste portuguesa, ventos superiores a 10 m/s ocorrem ocasionalmente, representado 0.93% dos registos (3 a 4 dias por ano), enquanto ventos com capacidade de



transportar sedimentos (mais de 6 m/s) ocorrem cerca de 65 a 70 dias por ano. Ventos inferiores a 6 m/s são os mais comuns, representando 81.53% do total de registos. No entanto, estes ventos não são suficientemente fortes para iniciar o movimento de sedimentos e contribuir para o transporte sedimentar eólico (CN3, CN5, CN6 e CN7). Ventos entre 6-8 m/s (representam 13.65% do ano) ocorreram em 3 campanhas (CN1, CN4 e CN8), no entanto só foi observado transporte efetivo em CN1 e CN8, pois fatores como a humidade das areias e a largura da praia condicionaram o transporte sedimentar eólico.

CONCLUSÕES

O transporte sedimentar eólico foi analisado em dois pontos do perfil, na alta praia (C2) e na duna (C4), relacionando os resultados com as velocidades de vento medidas em campo. Apenas foi medido transporte efetivo nas campanhas CN1, CN2 e CN8, com máximos observados na campanha CN2 (média das caixas de 17 g/m/s) associados a ventos com velocidade superiores a 10 m/s. É nestes momentos que se observa a maior acumulação de sedimentos nos passadiços, que se encontram colmatados por efeito do transporte eólico, comprometendo a sua funcionalidade. Desta forma, é necessário considerar os processos eólicos na gestão e manutenção dos passadiços, com limpezas periódicas, de forma a facilitar o acesso pedonal à praia, protegendo também os sistemas dunares. Os trabalhos em curso incluem a realização de mais campanhas e a avaliação de outras variáveis com influência no transporte sedimentar eólico, com o objetivo de estimar taxas típicas de acumulação de sedimentos nos passadiços de acesso às praias, facilitando a gestão destas infraestruturas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo projeto COAST-SCAPES, financiado pela EU Grants (ID: 101213138) e pela FCT, Grant UID/6438/2025 da unidade de investigação CERIS.

REFERÊNCIAS

Pourteimouri, P., Campmans, G.H.P., Wijnberg, K.M. & Hulscher, S.J.M.H. (2022). A Numerical Study on the Impact of Building Dimensions on Airflow Patterns and Bed Morphology around Buildings at the Beach. JMSE, 10(1), 13.

Vos, S., van IJendoorn, C., Lindenbergh, R. & de Wulf, A. (2024). Non-uniform dune development in the presence of standalone beach buildings. Geomorphology, 466, 109402.

Palavras-Chave: Passadiços; Deposição Sedimentar; Velocidade do Vento; ERA5; Anemómetro de Copos



INFERRING TOPOGRAPHIC CHANGES IN INTERTIDAL FLATS OF THE SADO ESTUARY USING SENTINEL-2 IMAGERY

Matilde CORREIA¹, Carlos David SANTOS¹

1. MARE - Marine and Environmental Sciences Centre, ARNET - Aquatic Research Network Associate Laboratory, NOVA School of Science and Technology, NOVA University Lisbon, Caparica, Portugal, matilde.correia1@hotmail.com, cdsantos@fct.unl.pt

INTRODUCTION

Estuaries are highly dynamic systems undergoing continuous geomorphological and ecological change. These coastal wetlands are of major ecological importance, contributing significantly to biodiversity maintenance, carbon sequestration, and shoreline stabilization. Tidal flats, specially, provide essential environmental conditions that support the coexistence of benthic invertebrates, fish and shorebirds.

Climate change is a key driver of change in intertidal environments. Particularly, sea-level rise has been associated with increased coastal erosion and the landward migration of salt marshes and tidal flats, often leading to considerable impacts on the estuarine ecosystem. Geomorphological changes may also be caused by direct human influences, such as dredging and vessel traffic. Monitoring geomorphological changes in intertidal flats is essential to understand human impacts on estuarine species and to support effective management and conservation strategies.

This study aims to explore erosion–accretion trends in the intertidal flats of the Sado estuary, the second largest estuary in Portugal. The Sado estuary is home for a large variety of fauna and flora, but despite its ecological importance, it remains comparatively understudied compared to other major Portuguese coastal wetlands, such as the Tagus Estuary, Ria de Aveiro, and Ria Formosa.

In 1980, the Sado Estuary was designated as a natural reserve to protect its biodiversity, therefore requiring surveying approaches to monitor environmental change and inform management planning and actions.

DATA AND METHODS

Remote sensing has become a key tool for monitoring coastal wetlands, enabling rapid, cost-effective, and spatially consistent assessment of environmental change. This study aims to explore erosion–accretion patterns in the Sado Estuary between 2017 and 2025 using Sentinel-2 imagery processed in Google Earth Engine. For each analysis, we used a set of images from the Sentinel-2 harmonised image collection (Copernicus/S2_SR_HARMONISED) with a cloud cover filter set to less than 20%.

The first step was to identify the intertidal flats within the estuary. To this end, a supervised Random Forest model was applied to the original Sentinel-2 bands, the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) and the Normalised Difference Water Index (NDWI), enabling the distinction between water, land and intertidal flats. The intertidal flats were exported as assets and used as polygons to define the area of interest for the elevation models. Subsequently, an intertidal elevation model was derived from Sentinel-2 observations. All pixels located within the intertidal area were initially included in the elevation modelling procedure. To ensure sufficient representation of both inundated and exposed conditions, a quality filtering step was applied to the near-infrared (NIR) reflectance time series. Pixels with fewer than five valid observations within the reflectance range of 0–500 (typically associated with inundated conditions) and fewer than five observations within the range

of 1000–1500 (associated with exposed sediment surfaces) were excluded from the analysis, improving the robustness and reliability of the elevation estimates. Following Bué *et al.* (2020), a logistic relationship exists between NIR surface reflectance and tidal inundation, which allows the inversion of tidal signal variability into elevation estimates. In general, higher reflectance values correspond to low tide conditions, while lower values indicate high tide conditions. Based on this relationship, equation was used to estimate tidal height-related variability.

$$\rho_i(x, y) = \frac{\text{topasymptote} - \text{bottomasymptote}}{1 + e^{-a(h_i - h_t)}} + \text{bottomasymptote} \quad i = 1, \dots, M \quad (1)$$

where represent pixel coordinates, is the NIR reflectance, represents tidal height, and corresponds to the elevation of each pixel. The parameter is associated with the steepness of the logistic function. Tidal height at the time of satellite acquisition was estimated using a simplified harmonic interpolation (equation) based on official tide tables from the Hydrographic Institute.

$$h_{sat} = h_{HighWater} - \frac{(h_{HighWater} - h_{LowWater}) * \left(\cos \left(\pi * \frac{t_{sat} - t_{LowWater}}{t_{HighWater} - t_{LowWater}} \right) + 1 \right)}{2} \quad (2)$$

where is the predicted water level at satellite acquisition time (), and correspond to the low- and high-water marks, respectively, and and to the corresponding times.



Figure 1- Erosion trend estimated over the last nine years (2017-2025) in the Sado estuary intertidal area. Green color indicates accretion, red indicates erosion and white indicates stability over the respective period.



The derived intertidal elevation model was compared with LiDAR data from the Sado Estuary provided by ICNF (2021). The results revealed a consistent nonlinear (S-shaped) relationship between model estimates and LiDAR observations, indicating a systematic bias in the model, possibly related to differences in moisture retention and roughness of the sediments.

To address this bias, a cubic transformation was applied to the model outputs. The transformation parameters were empirically optimized to minimize the root mean square error (RMSE) over a five-year calibration dataset. The corrected model achieved a RMSE of 30 cm and a mean absolute error (MAE) of 22 cm for the 2021 validation dataset.

The calibrated model was then applied to the full Sentinel-2 time series (2017–2025) to derive annual intertidal elevation maps. To assess morphological trends, a pixel-wise robust linear regression was performed on the time series, and slope values were extracted. Positive slopes indicate accretion, negative slopes indicate erosion, and values close to zero indicate stability or compensatory sediment dynamics.

RESULTS AND DISCUSSION

Overall, the spatial distribution of trends is consistent with a possible sediment redistribution process, whereby erosion occurs preferentially near tidal channels and accretion in upper intertidal areas. Local exceptions are also observed, with some shoreline zones showing erosion, possibly associated with marsh-edge retreat. Near Mourisca, a localized pattern of sediment accumulation is identified, potentially related to the renaturalization of abandoned saltpans following the breaching of former embankments. These findings provide a preliminary indication of spatial patterns of erosion and accretion within the intertidal area. However, further validation using field measurements is required to confirm the observed trends.

Palavras-Chave: bathymetry; remote sensing; logistic regression; erosion trend; intertidal.





XII CPGZC

RISCOS E RESILIÊNCIA COSTEIRA NA CPLP

CARATERIZAÇÃO DO CLIMA DE ONDAS E PERIGOS COSTEIROS DA CIDADE DA BEIRA. MOÇAMBIQUE

Rogério CUINHANE^{1,2}, José FERREIRA¹, Conceição FORTES², Rui CAPITÃO², Liliana PINHEIRO²

1. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus da Caparica, Quinta da Torre 2829-516 - MARE | MARE - Marine and Environmental Sciences Centre/ ARNET - Aquatic Research Network Associate Laboratory, (Portugal),
r.cuinhane@campus.fct.unl.pt; jcrf@fct.unl.pt

2. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa (Portugal) jfortes@lnec.pt, rcapitao@lnec.pt, lpinheiro@lnec.pt

RESUMO

A cidade da Beira, localizada sobre uma planície costeira baixa, com altitude média inferior a 2 m na costa central de Moçambique, constitui um dos territórios urbanos costeiros mais expostos no continente africano. Com 743.565 habitantes e principal porto de acesso aos países sem litoral da África Austral, a Beira combina elevada exposição física com vulnerabilidade socioeconómica estrutural e escassez de dados oceanográficos locais. Em março de 2019, o Ciclone Idai evidenciou de forma dramática esta exposição, com uma sobrelevação estimada de 5,62 m, destruição de cerca de 70% das habitações, danos em 90% da rede elétrica e 602 vítimas mortais. Apesar da magnitude do evento e do risco crescente associado às alterações climáticas, a Beira carece de uma caracterização quantitativa avançada do seu clima de ondas – lacuna que esta investigação procura suprir.

Esta comunicação apresenta resultados da Fase I de uma investigação doutoral em curso, dedicada exclusivamente à caracterização quantitativa do clima de ondas e dos perigos costeiros daí decorrentes na Frente Indica da Cidade da Beira. A metodologia assenta em três fases complementares: (i) análise estatística de 47 anos de dados de reanálise atmosférica obtidos a partir do modelo ERA5 (ECMWF, 2025) com 136.036 registos tri-horários, entre 1979 e 2025, resolução 0,25°, extraídos no ponto (L_S) com recurso à aplicação ERA5 Downloader V.5.4; (ii) modelação numérica da propagação das ondas com o modelo de terceira geração SWAN V40.72 (Booij *et al.*, 1996) através da interface SOPRO (Pinheiro *et al.* 2005), utilizando três malhas computacionais aninhadas com resoluções de 2000m, 400m e 200m, respetivamente, e extração de resultados em 8 pontos costeiros (P1 na praia de Ponta Gêa a P8 na praia de Macuti) na frente Indica da Beira; (iii) cálculo do nível máximo de inundação (runup) através da aplicação de 8 fórmulas empíricas a perfis de praia levantados in situ com GPS diferencial em fevereiro de 2026.

A análise ao largo revela uma altura significativa de onda (H_s) média de 1,83 m, com um máximo de 9,21 m, e direção dominante no quadrante sul-sudeste (150° - 180°). A sazonalidade é pronunciada: com H_s média de 1,8 m no inverno austral (junho-agosto) contra 1,4 m no verão (dezembro-fevereiro). A análise de extremos ao largo L_S pelo método dos máximos anuais (MYM), de máximos marítimos, resultou no ajuste da distribuição de extremos Fréchet como mais adequada ($r=0,979$) à amostra de 47 valores extremos, o que permitiu estimar extrapolações centenárias de H_s de 9,21 m, valor que serve de base ao dimensionamento das simulações de perigo costeiro. A propagação SWAN evidencia uma atenuação média de 43% em H_s entre o largo e a costa, controlada pela batimetria rasa do Banco de Sofala, com o ponto P6-Praia de Fatimar a registar máximos de exposição costeira ($H_s \text{ máx} = 3,07 \text{ m}$). Os níveis máximos de inundação calculados aplicando fórmulas empíricas de (Guza & Thornton, 1982) adotadas como referência, atingem 8,19 m (ZH - Zero Hidrográfico) em P6-Praia de Fatimar, valor acima das defesas costeiras existentes.

A avaliação do modelo encontra suporte na simulação do evento correspondente ao Ciclone Idai, com forçamento de vento de 200 km/h e $T_p=20 \text{ s}$, que produziu H_s máxima de 3,07 m em P6, fisicamente coerente com batimetria local (-2,17 m ZH), e denuncia a passagem do olho do ciclone sobre o Porto da Beira através de uma rotação direcional de 167° no ponto ao largo L_S.



A incorporação das tabelas de maré oficiais do Porto da Beira (IHP, 2019) no modelo, permitiu realizar uma análise de sensibilidade entre dois níveis de forçamento: 5,62 m correspondente ao nível total observado durante o Idai (baseado na literatura) e 4,6 m, correspondente ao preia-mar astronómica local de 15 de março de 2019. A variação de 1,02 m entre as duas condições produz uma redução sistemática de 12,2% em H_s nos pontos costeiros P1-P8, com o ponto ao largo L_S a manter o valor máximo (3,62 m) em ambas as simulações. Este resultado demonstra que o modelo opera num regime de dissipação batimétrica fisicamente coerente, validando retrospectivamente as simulações de regime histórico e confirmando a robustez dos resultados face à variação de condições de fronteira. Esta calibração de um modelo numérico de ondas na Beira com dados de maré locais elimina a dependência de dados a nível regional utilizados em estudos anteriores.

Os resultados disponibilizam a primeira série temporal de 47 anos de clima de ondas para a Frente Indica da Cidade da Beira em contexto de escassez crónica de dados observacionais. A base empírica produzida, incluindo mapas de período de retorno e níveis máximos de inundação por praia, constitui um suporte quantitativo essencial para as fases seguintes da investigação, bem como para estratégias de adaptação costeira, planeamento urbano resiliente e redução do risco na cidade da Beira.

Palavras-chave: Clima de ondas; Modelação numérica SWAN; Adaptação costeira; Moçambique; Beira; Infraestruturas Verde-Azuis; Vulnerabilidade costeira

AGRADECIMENTO:

FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P. (UID/4292/202), *MARE - Marine and Environmental Sciences Centre* (LA/P/0069/2020) - *ARNET – Aquatic Research Network*. PRT/BD/154917/2022

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Booij, N., L.H. Holthuijsen and R.C. Ris, 1996: The "SWAN" wave model for shallow water, Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng., Orlando, 668-676.

ECMWF. (2022). ERA5 Reanalysis Datasets. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>.

Pinheiro, L., Fortes, C.J.E.M., Santos, J., Neves, G.N., Capitão, R., Coli, A. (2005). SOPRO - Caracterização da Agitação Marítima. Aplicações. 4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. Angra do Heroísmo, 20 e 21 de outubro de 2005.

Instituto Hidrográfico Português (2019). Tabela de marés: Porto da Beira (Vol.2). Marinha.

Guza, R. T., & Thornton, E. B. (1982). SWASH Oscillations on a Natural Beach. In Journal of Geophysical Research (Vol. 87, Number C1).



RESILIÊNCIA CLIMÁTICA DO SETOR ENERGÉTICO NA GUINÉ-BISSAU: O CONTEXTO DA INUNDAÇÃO E DA EROSÃO NUMA ABORDAGEM MULTIRRISCO

Luciana das NEVES^{1,2}, Hilario CASTRO LARA², Els VAN UYTVEN², Florian SPARAVIER³

1. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, Porto, 4200-465, Portugal, lpneves@fe.up.pt

2. International Marine and Dredging Consultants nv, Van Immerseelstraat, 66 -B2018 Antuérpia, Bélgica

3. Safège – Suez Consulting, De Kleetlaan, 5 - B1831 Diegem, Bélgica

ENQUADRAMENTO

O setor energético da Guiné-Bissau encontra-se num momento de transição, partindo de um contexto de acesso limitado à eletricidade (cerca de 29%), fortemente concentrado em Bissau (58%), com custos elevados e predominância da geração a gásóleo e fuelóleo pesado. O plano nacional de desenvolvimento energético, parcialmente financiado pelo Banco Mundial, tem vindo a promover soluções orientadas para a redução de custos e aumento do acesso, combinando a importação de energia hidroelétrica — no âmbito da interconexão regional da OMVG (*Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie*) — com a expansão de centrais solares, micro-redes e sistemas de armazenamento. Este contexto constitui uma oportunidade para avaliar a resiliência do sistema elétrico face a ameaças climáticas e para integrar, explicitamente, o risco climático no planeamento e conceção das infraestruturas, de modo a evitar perdas económicas, interrupções prolongadas e fragilidades operacionais. O presente trabalho sintetiza uma assistência técnica prestada ao Banco Mundial, consistindo numa avaliação multirrisco climático aplicada ao setor energético da Guiné-Bissau, com horizonte de 2050 e cenários RCP4.5 e RCP8.5. A análise incide particularmente sobre os riscos costeiros de inundação (incluindo a interação com as componentes fluvial e pluvial) e de erosão costeira. O objetivo é demonstrar como a integração da cartografia de perigos, da avaliação da vulnerabilidade de ativos e da simulação de redes permite hierarquizar riscos e apoiar decisões de adaptação, com especial atenção aos efeitos sistémicos associados a falhas em subestações, sistemas de transmissão e distribuição, e micro-redes.

METODOLOGIA

A abordagem desenvolve-se em três etapas: (i) avaliação dos riscos climáticos, através da identificação e do mapeamento das principais ameaças ao setor energético; (ii) análise da vulnerabilidade de infraestruturas e ativos elétricos, combinando a probabilidade de ocorrência com as consequências económicas e operacionais; e (iii) definição de medidas de adaptação para reforço da resiliência.

A caracterização dos perigos baseia-se em indicadores de severidade específicos, incluindo a profundidade de água e a extensão de inundação (pluvial, fluvial e costeira), o índice meteorológico de incêndio (Fire Weather Index, FWI), a temperatura máxima diária extrema, ou a taxa de variação da linha de costa. A análise integra dados climáticos históricos e projeções até 2050 e, para cada local, relaciona a intensidade dos fenómenos com a sua probabilidade de ocorrência, o que permite traduzir eventos, mais ou menos severos, em frequência esperada.

A vulnerabilidade dos ativos (por exemplo, centrais solares, sistemas de baterias e de armazenamento, e outros componentes dos sistemas de geração, transmissão e distribuição) é avaliada com base em matrizes que relacionam probabilidade e consequência, incluindo custos de reparação e energia não servida. A dimensão sistémica é analisada através de simulações da



rede (principal e micro-rede representativa), o que permite estimar a Energia Esperada Não Servida (EENS) e identificar ativos críticos com efeitos de disrupção em cascata.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação multirrisco proposta para este estudo permitiu identificar as inundações como a principal ameaça climática para o setor energético da Guiné-Bissau, com expressão recorrente no litoral e ao longo dos principais corredores fluviais. Entre as diferentes componentes, a inundação pluvial apresenta, em geral, níveis de perigo baixos, e a sua evolução futura é limitada pela escassez de projeções específicas. Em contraste, a inundação costeira evidencia um agravamento significativo até 2050, com aumento da área afetada de cerca de 1.568 km² (histórico) para mais de 2.000 km² nos dois cenários considerados (RCP4.5 e RCP8.5), bem como uma progressão para níveis de maior severidade. Este padrão é particularmente relevante em zonas estuarinas e deltaicas, onde a baixa altitude favorece a interação entre processos costeiros e fluviais. As cheias fluviais apresentam igualmente uma tendência de intensificação, com aumento das profundidades e expansão das áreas inundáveis. As diferenças entre cenários são reduzidas, o que reflete incertezas associadas à modelação climática e hidrológica, recomendando prudência na interpretação dos resultados à escala local e a necessidade de realizar modelação hidráulica detalhada.

A análise de vulnerabilidade confirma a inundação como o principal fator de risco para os ativos energéticos. Sistemas como centrais solares e baterias tornam-se vulneráveis em zonas sujeitas a níveis elevados de ameaça de inundação, sobretudo quando a frequência dos eventos gera perdas acumuladas significativas. A elevação de ativos acima da cota correspondente a cheias centenárias apresenta-se como uma medida de adaptação eficaz. Recomenda-se a adoção de alturas entre 0,4 m e 2,2 m para centrais solares e baterias, podendo esta medida ser igualmente aplicada a instalações domésticas, com vista à redução de falhas na rede de baixa tensão. Não obstante, as centrais analisadas situam-se em zonas com baixa intensidade de inundação (níveis 1–2), o que evidencia que a consideração dos riscos climáticos na fase de planeamento — conduzindo a uma seleção criteriosa do local de instalação — constitui uma medida de adaptação particularmente eficaz e de baixo custo.

A análise dos sistemas de transmissão e de distribuição reforça estes resultados. No modelo da rede principal, foram identificadas subestações críticas (por exemplo, Saltinho e Bambadinca) cuja falha pode provocar interrupções extensas a jusante. As simulações indicam que medidas de proteção nestes ativos permitem reduções superiores a 60% na Energia Esperada Não Servida (EENS), enquanto intervenções distribuídas, como a elevação das instalações domésticas, podem reduzir a EENS em cerca de 30%. Estes resultados evidenciam a importância de intervenções combinadas ao nível da rede e da procura, bem como da priorização de ativos críticos e da utilização de medidas de contingência, como geradores móveis para cargas essenciais.

Ao nível das micro-redes, o caso de Bambadinca evidencia vulnerabilidades localizadas associadas à proximidade de um rio. A introdução de mecanismos simples de proteção, como a instalação de disjuntores que permitam isolar troços vulneráveis, revela-se altamente eficaz na redução da energia não servida, demonstrando o papel da segmentação funcional na resiliência de sistemas descentralizados.

Em contraste, a erosão costeira apresenta níveis globalmente baixos a moderados e, de modo geral, localizados. Embora sejam identificados alguns pontos críticos (nomeadamente em Cacheu e Tombali), a maioria das áreas em erosão situa-se em áreas naturais com reduzida exposição de infraestruturas. As ilhas analisadas evidenciam, em geral, estabilidade da linha de costa, com processos locais de acreção associados a mangais. Neste contexto, não se justificam medidas adicionais específicas para os ativos energéticos considerados, sendo mais relevante assegurar critérios prudentes de localização em futuros projetos. Ainda assim, importa notar que as projeções se baseiam em extrapolação linear de tendências históricas, podendo subestimar efeitos futuros associados à subida do nível médio da água do mar ou a alterações no balanço sedimentar.



Em síntese, os resultados evidenciam a centralidade das inundações — em particular, da componente costeira e da sua interação com a dinâmica fluvial — como principal risco para o sistema energético da Guiné-Bissau, destacando a importância de integrar, de forma sistemática, o risco climático no planeamento, na localização e na conceção das infraestruturas.

CONCLUSÕES

A avaliação multirrisco climático aplicada ao setor energético da Guiné-Bissau demonstra que a inundação — em particular nas componentes costeira e fluvial — constitui o risco dominante para a resiliência do sistema elétrico. Tal decorre, não só do agravamento expectável da sua extensão e intensidade até 2050, mas também do seu potencial para afetar nós críticos da rede, gerando impactos em cascata na continuidade do serviço. Em paralelo, a erosão costeira apresenta-se, no horizonte considerado, como um perigo globalmente baixo a moderado e espacialmente localizado, com relevância imediata limitada para os ativos avaliados. Ainda assim, permanece um fator estratégico a considerar nas decisões de implantação em zonas litorais, sobretudo face às incertezas associadas à eventual aceleração futura dos processos costeiros.

Do ponto de vista da adaptação, destacam-se três mensagens principais. Em primeiro lugar, a seleção criteriosa da localização de novos ativos, suportada por cartografia de perigos, revela-se uma medida de elevada eficácia e de reduzido custo marginal, devendo ser integrada nos termos de referência e nos processos de decisão de investimento. Em segundo lugar, nas áreas expostas a inundações, a adoção de medidas estruturais — como a elevação de equipamentos e o reforço das medidas de proteção e dos sistemas de drenagem em subestações críticas — pode reduzir significativamente a energia não fornecida e os custos associados às interrupções do serviço. Em terceiro lugar, em sistemas descentralizados, a segmentação da rede através de dispositivos de proteção (como disjuntores) e a preparação operacional — incluindo manutenção preventiva, gestão de vegetação e planeamento de resposta — são determinantes para limitar a propagação de falhas e acelerar a recuperação pósevento.

Em síntese, a integração do risco climático no planeamento energético afirma-se não apenas como um exercício de diagnóstico, mas como um instrumento essencial de otimização do investimento e de reforço da robustez operacional, com benefícios diretos para a segurança de abastecimento em contextos costeiros e ribeirinhos particularmente vulneráveis.

Palavras-Chave: avaliação multirrisco climático; resiliência climática; inundação costeira; cheias fluviais; erosão costeira.



ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR, SUBSIDÊNCIA DO SOLO, URBANIZAÇÃO, CHUVAS TORRENCIAIS: DESAFIOS PARA A SUSTENTABILIDADE DE RECIFE

Jaime J. S. P. CABRAL¹, Gastão C. FONSECA NETO², Marcos A. B. SILVA JUNIOR³,
Arivânia B. RODRIGUES⁴, Wendson O. SOUZA⁵

1. UPE e UFPE, Recife - PE (Brasil), jaime.cabral@poli.br

2. UFPE e CEMADEN, Recife - PE (Brasil), gastaoacerquinha@gmail.com

3. UPE, Recife - PE (Brasil), mabsj@poli.br

4. UFS, Lagarto - SE (Brasil), arivania_@hotmail.com

5. UFPI, Teresina - PI (Brasil), wendsonsouza@ufpi.edu.br

INTRODUÇÃO

Como a combinação entre elevação do nível do mar, subsidência do solo, impermeabilização urbana e intensificação das chuvas extremas aumenta o risco de inundações compostas em Recife? Localizada na região Nordeste do Brasil, a cidade do Recife, capital do estado de Pernambuco, é formada por uma extensa planície costeira com cotas variando entre 1,0 m e 9,0 m e apresenta elevada vulnerabilidade a inundações decorrentes da interação entre processos naturais e antrópicos. Sua configuração geomorfológica, caracterizada por uma planície flúvio-marinha circundada por morros com altitudes próximas a 100 m, favorece a convergência dos escoamentos superficiais em direção às áreas mais baixas. Nas últimas décadas, o intenso processo de urbanização do Recife, que atualmente abriga aproximadamente 1.488.920 habitantes e possui bairros com densidade populacional chegando a 302,8 hab./hectare (IBGE, 2022), promoveu significativa expansão das superfícies impermeáveis, aumentando os volumes escoados e reduzindo a capacidade de infiltração. Simultaneamente, as mudanças climáticas têm intensificado a frequência e a magnitude dos eventos extremos, ampliando a exposição da população e da infraestrutura aos riscos associados. Nesse contexto, este trabalho analisa os efeitos combinados da elevação do nível do mar, da subsidência do solo, da impermeabilização urbana e da intensificação das chuvas extremas sobre as inundações compostas em Recife, discutindo implicações para a adaptação climática em cidades costeiras de baixa altitude.

METODOLOGIA

A pesquisa baseou-se na integração de informações provenientes de diferentes fontes de dados hidrológicos, climáticos, oceanográficos, geotécnicos e geoespaciais. Foram analisadas séries históricas de precipitação da estação meteorológica do Curado, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com dados a partir de 1961, visando identificar tendências na frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação superiores a 100 mm em 24 h. As informações sobre elevação do nível do mar e variabilidade das marés foram obtidas a partir de estudos prévios desenvolvidos para o litoral pernambucano, complementados por projeções climáticas globais recentes. A subsidência do solo foi avaliada por meio da técnica de Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR), com base no estudo de Souza *et al.* (2024), que utilizou dados do satélite PAZ referentes ao período de 2019 a 2023, permitindo estimar taxas de deslocamento vertical em diferentes setores da cidade. A análise integrada considerou a interação entre marés elevadas, condições de jusante dos sistemas de drenagem urbana, chuvas intensas, processos de subsidência diferencial e possíveis influências operacionais de barragens localizadas a montante da cidade, caracterizando cenários de inundação composta e risco multiameaça.

ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR

A elevação do nível do mar, além de intensificar a frequência de inundações em dias de sol, compromete o funcionamento dos sistemas de macrodrenagem urbana ao elevar as condições de jusante e dificultar o escoamento das águas pluviais. A interação entre marés elevadas e eventos de chuva intensa pode resultar em inundações mais extensas, profundas e duradouras, mesmo quando cada um desses fatores, isoladamente, não seria suficiente para provocar transbordamentos significativos. No caso de Recife, podem ocorrer eventos de inundação composta, resultantes da combinação de chuvas intensas, elevação do nível do mar, marés astronômicas e ações operacionais de barragens situadas a montante da cidade.

Mesmo que as emissões de gases de efeito estufa sejam estabilizadas, as projeções indicam que o nível médio do mar poderá apresentar elevação entre 0,28 m e 0,76 m até 2100 (IPCC, 2021) e no nordeste do Brasil, estudos locais avaliam 0,70 m, a partir do AR5 do IPCC. Em estudo clássico, Harari, Camargo e Gordon (1994) analisaram registros de marés entre 1945 e 1987 e identificaram uma tendência de aumento do nível médio do mar em Recife da ordem de 0,52 cm/ano, o que corresponde a aproximadamente 40 cm até o final do século. Fonseca Neto *et al.* (2022) avaliaram os efeitos do aumento do nível do mar no território de Recife, utilizando um Modelo Digital do Terreno (MDT) do Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), na escala de 1:5.000 e com erro vertical inferior a 25 cm, integrado a dados de maré máxima (1,56 m) e projeções do IPCC (+0,70 m) para simular cenários atuais e futuros. Os resultados indicaram que o número de bairros vulneráveis pode aumentar de 12 para 28 até o final do século, com destaque para Boa Viagem, Afogados, Imbiribeira e IPSEP. Para uma cidade costeira de baixa altimetria, o cenário representa um fator adicional de agravamento da vulnerabilidade às inundações.

AUMENTO DA INTENSIDADE E FREQUÊNCIA DAS CHUVAS TORRENCIAIS

A Figura 1 mostra as chuvas máximas diárias registradas entre 1961 e 2022, revelando que nos últimos dez anos da série (2013–2022), apenas poucos anos apresentaram acumulados inferiores a 100 mm, enquanto eventos acima de 150 mm foram registrados em 2019 e 2022 (Figura 1). Silva Junior *et al.* (2020) identificaram que eventos de precipitação superiores a 100 mm em 24 horas ocorrem, em média, 1,3 vez por ano. Ainda segundo os autores, a análise da série de dados iniciada em 1961, usando regressão linear e teste de Mann-Kendall, revelou tendência de aumento na frequência desses eventos.

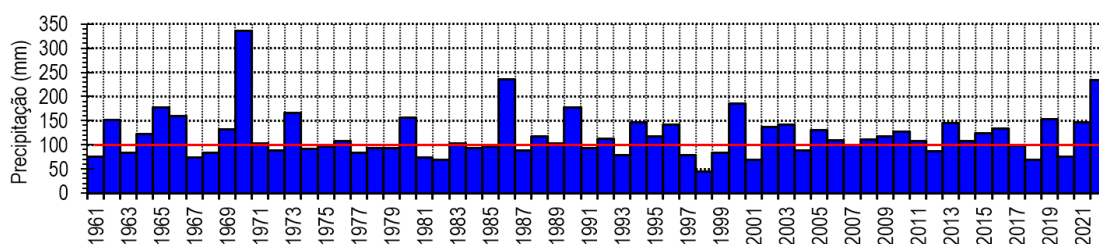


Figura 1 – Maiores chuvas diárias registradas na estação do Curado, em Recife, a partir de 1961. Fonte: Autores, com base nos dados do INMET.

As séries históricas de temperatura, iniciadas em 1961, indicam aumento de aproximadamente 1 °C, com valores acima da média histórica desde os anos 2000 (Silva Junior *et al.*, 2020). Esse aquecimento, associado à formação de ilhas de calor decorrentes da urbanização e verticalização, pode intensificar a ocorrência de chuvas mais intensas e concentradas.

SUBSIDÊNCIA DO SOLO

A planície do Recife é formada por uma espessa camada de sedimentos de origem flúvio-marinha, com mais de 200 metros na sua parte leste, e suscetível a processos de subsidência. Souza *et al.* (2024) identificaram subsidência na zona sul, em até 3,8 mm/ano, e na zona oeste, com grandes áreas de rebaixamento, em torno de 15 a 25 mm/ano (Figura 2). Esse processo reduz progressivamente as cotas topográficas relativas, intensificando os efeitos da elevação relativa do nível do mar e ampliando a exposição das áreas urbanas a eventos de inundação. A subsidência diferencial também pode comprometer o desempenho da infraestrutura de drenagem, alterando declividades hidráulicas, reduzindo a capacidade operacional de canais e galerias e aumentando a suscetibilidade a alagamentos recorrentes.

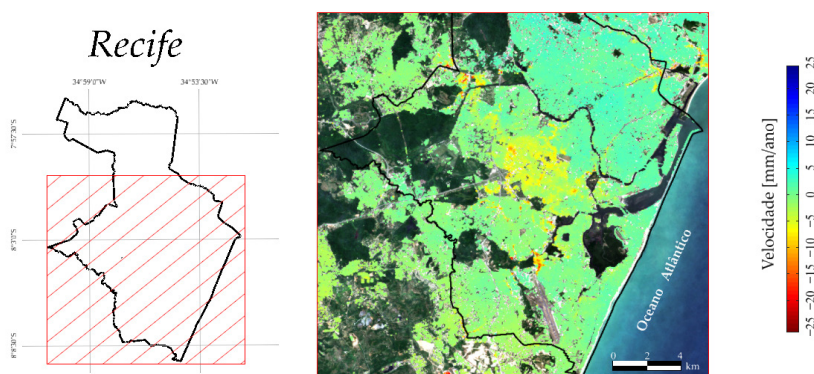


Figura 2 – Mapa de velocidade na direção vertical via satélite PAZ (2019-2023) no território de Recife. Fonte: Souza *et al.* (2024).

COMENTÁRIOS FINAIS

A análise mostrou que a vulnerabilidade de Recife resulta da interação entre fatores climáticos, hidrológicos, oceanográficos, geotécnicos e antrópicos, configurando um cenário de risco multiameaça. A tendência é de intensificação das inundações compostas nas próximas décadas, impulsionada pela elevação do nível do mar, subsidência do solo, aumento das chuvas extremas e expansão da impermeabilização urbana. Diante desse cenário, a cidade começou a revisar os critérios de projeto da drenagem urbana, incorporando cenários combinados de maré, precipitação extrema e subsidência aos estudos hidrológicos. Começou também a implantar soluções baseadas na natureza e fortalecer o planejamento territorial, com prioridade para áreas mais vulneráveis. No ano de 2037, o Recife será a primeira capital do Brasil a completar cinco séculos, e o Plano Recife 500 anos, busca estratégias de adaptação e resiliência, que visam preparar Recife para os impactos das mudanças climáticas, melhorar a infraestrutura de drenagem e reduzir a vulnerabilidade a eventos extremos. A implementação dessas ações promove a resiliência ambiental e também contribui para o desenvolvimento social e urbano sustentável.

REFERÊNCIAS

- Fonseca Neto, G. C.; Silva Junior, M. A. B.; Cabral, J. J. S. P.; Silva, A. C. (2022). Áreas vulneráveis ao aumento do nível do mar em cidades costeiras: um estudo na cidade do Recife, Brasil. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 12(1), 20–27.
- Harari, J.; Camargo, R.; Gordon, M. (1994). On tides and mean sea level of Recife (8°3.3'S 34°51.9' W) and Belém (1°26.2'S 48°29.6'W). *Boletim do Instituto Oceanográfico*. Universidade de São Paulo.
- IPCC. *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: Cambridge University Press, 2021.



INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Recife: panorama do Censo 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

Silva Junior, M. A. B.; Fonseca Neto, G. C.; CABRAL, J. J. S. P. (2020). Análise estatística para detecção de tendências em séries temporais de temperatura e precipitação no Recife-PE. *Revista de Geografia*, 37(1), 222–240.

Souza, W. O; Reis, L. G. M.; Cabral, J. J. S. P; Ruiz-Armenteros, A. M.; Coutinho, R. Q.; Pacheco, A. P.; Aragão Junior, W. R. (2024). Analysis of Urbanization-Induced Land Subsidence in the City of Recife (Brazil) Using Persistent Scatterer SAR Interferometry. *Remote Sensing*, 16, 2592–2619.

Palavras-Chave: Inundação composta; Adaptação climática urbana; Vulnerabilidade costeira em planícies baixas.



DA APLICAÇÃO NACIONAL À TRANSFERÊNCIA INTERNACIONAL: POTENCIAL DA FERRAMENTA COAST NA GESTÃO COSTEIRA EM PAÍSES CPLP

Márcia LIMA¹, Carlos COELHO²

1. CERIS & Universidade Lusófona (Centro Universitário do Porto), 4000-098, Porto, Portugal, marcia.lima@ulusofona.pt

2. CERIS & Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, Aveiro, 3810-193, Portugal, ccoelho@ua.pt

INTRODUÇÃO

As zonas costeiras dos países da Comunidade de Países de Língua Portuguesa (CPLP) são extensas e apresentam elevada vulnerabilidade à erosão costeira e aos impactos das alterações climáticas, traduzindo-se em riscos significativos para populações, infraestruturas e ecossistemas. Em muitos destes territórios, a limitação de dados de monitorização e a escassez de recursos técnicos e financeiros constituem obstáculos relevantes à implementação de estratégias de gestão costeira sustentadas e de longo prazo. Neste contexto, torna-se fundamental a aplicação de ferramentas de apoio à tomada de decisão que permitam avaliar, de forma integrada, o desempenho físico e a viabilidade económica de diferentes opções de intervenção, contribuindo para uma gestão mais informada, eficiente e orientada para a adaptação às alterações climáticas.

O presente trabalho analisa o potencial de aplicação da ferramenta COAST em contextos com escassez de dados e elevada vulnerabilidade costeira, com particular relevância para os países CPLP. Esta análise baseia-se na estrutura metodológica da ferramenta e na experiência adquirida em projetos anteriores, nomeadamente o projeto COAST4US, do ponto de vista da sua aplicação e resultados, e o AX-COAST, no qual foram desenvolvidas abordagens para a sua utilização em condições de limitada disponibilidade de dados.

FERRAMENTA COAST

A ferramenta COAST (Coastal Optimization Assessment Tool), desenvolvida na Universidade de Aveiro (Lima, 2018), foi concebida para apoiar a análise custo-benefício de intervenções de defesa costeira, integrando diferentes componentes numa abordagem sequencial e estruturada. A metodologia combina a modelação da evolução da linha de costa, o prédimensionamento de soluções de engenharia e a avaliação económica de cenários de intervenção. A componente de evolução da linha de costa permite estimar alterações morfológicas associadas a diferentes cenários, quantificando ganhos ou perdas de território ao longo do tempo. O módulo de pré-dimensionamento possibilita a definição das características das intervenções e a estimativa dos respetivos custos de construção e manutenção. Por sua vez, a componente económica permite avaliar a viabilidade das soluções através de indicadores como o valor atual líquido e o rácio benefício-custo, suportando a comparação entre cenários de referência e cenários de intervenção. A integração destas componentes numa única ferramenta permite realizar análises consistentes e comparáveis, facilitando a avaliação de múltiplas alternativas num curto intervalo de tempo. Esta capacidade é particularmente relevante em fases de planeamento, onde a necessidade de testar diferentes soluções e priorizar intervenções assume um papel central. Neste enquadramento, a COAST constitui uma ferramenta de apoio à decisão que contribui para a transição de uma gestão do litoral que é frequentemente reativa, centrada na resposta a impactos causados por eventos extremos, para uma abordagem mais preventiva, baseada na análise integrada de critérios físicos e económicos, facilitando o planeamento e gestão em perspetivas de médio e longo-prazo.

EVIDÊNCIA DE APLICAÇÃO E EVOLUÇÃO METODOLÓGICA

A aplicação da ferramenta COAST em troços críticos do litoral português, no âmbito de projetos como o COAST4US (Lima e Coelho, 2024), permitiu demonstrar a sua capacidade para apoiar a análise e comparação de múltiplos cenários de intervenção em contextos reais. Através da integração das componentes física e económica, foi possível avaliar o desempenho de diferentes soluções ao longo de horizontes temporais de médio e longo prazo em três trechos de elevado risco à erosão costeira no litoral oeste português: Aveiro, Figueira da Foz e Costa de Caparica. Os resultados obtidos evidenciam que, embora a maioria dos cenários de intervenção apresente benefícios do ponto de vista físico, apenas uma parte se revela economicamente viável, reforçando a importância da análise custo-benefício na definição e priorização de estratégias de gestão costeira. Destaca-se ainda a consistência dos resultados, que apontam para um melhor desempenho de soluções que atuam sobre as causas da erosão, nomeadamente a opção por intervenções de alimentação artificial com sedimentos, quando comparadas com soluções de estruturas de engenharia tradicionais (espórões e obras longitudinais aderentes), que visam principalmente proteger infraestruturas e bens.

Para além da validação da ferramenta em contextos com disponibilidade de dados relativamente elevada, importa considerar a sua adaptação a cenários com maior incerteza e limitação de informação. Neste âmbito, projetos como o AX-COAST contribuíram para explorar a aplicação da ferramenta em diferentes contextos, incluindo a sua utilização em casos de estudo internacionais, como Ijmuiden (Países Baixos), bem como o desenvolvimento de abordagens orientadas para contextos com menor disponibilidade de dados (agentes forçadores, como as ondas, por exemplo), evidenciando a necessidade de metodologias mais flexíveis (Lima e Coelho, 2024). A incorporação de análises de sensibilidade assume, neste contexto, um papel relevante, permitindo avaliar a robustez dos resultados face à incerteza associada aos dados de entrada e reforçando a fiabilidade das conclusões obtidas.

Com base na experiência adquirida na aplicação da ferramenta em contextos nacionais e internacionais e no desenvolvimento de abordagens para contextos com escassez de dados, discute-se o seu potencial de aplicação para outras realidades costeiras.

POTENCIAL DE APLICAÇÃO EM PAÍSES CPLP

Os países da CPLP apresentam elevada vulnerabilidade à erosão costeira e aos impactos das alterações climáticas (Figura 1), em contextos frequentemente marcados por limitações ao nível da disponibilidade de dados e da capacidade técnica para suporte à decisão. Por exemplo, no Brasil, com mais de 7 000 km de costa, estima-se que mais de metade da linha de costa apresente processos erosivos. Em Moçambique, a elevada exposição a eventos extremos, como ciclones, agrava os processos de recuo da linha de costa. Em Angola, a forte ocupação urbana em zonas costeiras aumenta a vulnerabilidade aos fenómenos de erosão e galgamento costeiro. Estas condicionantes dificultam a implementação de estratégias de planeamento sustentadas, conduzindo, em muitos casos, a respostas de natureza reativa. Neste contexto, a necessidade de ferramentas que integrem informação física e económica assume particular relevância.



Figura 1 – Exemplos de zonas costeiras em países CPLP sujeitas a elevada pressão antrópica e vulnerabilidade costeira, evidenciando a necessidade de estratégias integradas de gestão e adaptação: a) Fortaleza, Brasil; b) Maputo, Moçambique; e c) Luanda, Angola (Fonte: Google Earth).



CONCLUSÕES

O presente trabalho pretende demonstrar que a ferramenta COAST possui características que favorecem a sua aplicabilidade em contextos com escassez de dados e elevada vulnerabilidade costeira. A experiência adquirida na sua aplicação em contexto nacional e internacional demonstra a sua capacidade para integrar, de forma consistente, componentes físicas e económicas na análise de intervenções de defesa costeira, contribuindo para uma avaliação mais fundamentada de diferentes cenários. Adicionalmente, os desenvolvimentos metodológicos associados à sua aplicação em contextos com maior incerteza evidenciam a possibilidade de adaptação da ferramenta a diferentes níveis de disponibilidade de informação, reforçando a sua flexibilidade e robustez enquanto instrumento de apoio à decisão. Neste enquadramento, a COAST apresenta-se como uma ferramenta com potencial de aplicação em países CPLP, onde já se observam diferentes tipos de intervenções de defesa costeira (Figura 1) em resposta aos problemas de erosão e vulnerabilidade do litoral. A experiência adquirida com a aplicação da ferramenta em Portugal demonstra o seu potencial para apoiar a análise de cenários e a priorização de intervenções, evidenciando uma evolução para soluções que atuam sobre as causas da erosão. Adicionalmente, reforça a importância de discutir diferentes alternativas de intervenção e de avaliar os seus impactos físicos e económicos numa perspetiva de médio e longo prazo, promovendo abordagens de planeamento mais preventivas e uma utilização mais eficiente dos recursos disponíveis.

REFERÊNCIAS

- Lima, M. (2018). “Ferramenta numérica de análise do impacto de intervenções de defesa costeira na evolução da linha de costa: custos e benefícios”, Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 294 páginas.
- Lima, M. e Coelho, C. (2024). “COAST: Coastal Optimizations Assessment Tool”, Universidade de Aveiro, 176 páginas.

Palavras-Chave: Erosão costeira; Planeamento do litoral; Análise custo-benefício; Escassez de dados; Comunidade dos Países de Língua Portuguesa

SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA PARA PROMOVER A RESILIÊNCIA COSTEIRA: UM ESTUDO DE CASO NO NORTE DE PORTUGAL

Carla ROLO ANTUNES¹, Miguel AZEVEDO COUTINHO²

1. Universidade do Algarve – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Gambelas 8005-139 Faro, cmantunes@ualg.pt

2. Universidade de Lisboa – Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil, Av. Rovisco Pais 1049-001 Lisboa, m.azevedo.coutinho@tecnico.ulisboa.pt

As zonas costeiras desempenham um papel estratégico do ponto de vista ambiental, social e económico, pelo que numa perspetiva de gestão integrada do território é essencial a requalificação e valorização da orla costeira e a recuperação e reabilitação de cursos de água, que a elas afluem. Estas ações, determinantes para a resiliência do território e com grande relevância social, devem ser compatíveis com as condicionantes decorrentes dos instrumentos de ordenamento vigentes e assentarem num conjunto de princípios, de que se destacam a preservação do património natural, a valorização dos recursos, a promoção da biodiversidade e dos serviços ambientais.

Em Portugal Continental as zonas costeiras estão sujeitas a um complexo clima litoral de que resultam diversas ameaças naturais, por exemplo, erosão costeira, inundações, galgamento do sistema dunar, com diferentes tipos de perigosidade, cuja frequência e intensidade tendem a aumentar em consequência das alterações climáticas. Os riscos associados às dinâmicas da zona costeira, a médio e longo prazo, e a identificação de áreas de risco para salvaguarda de pessoas e bens são questões fundamentais no processo de planeamento e gestão territorial.

No seguimento dos fortes temporais que assolaram o litoral norte de Portugal (janeiro e fevereiro 2014), ocorreu a rutura e o arrasamento de parte da gola da duna do Caldeirão (localizada na foz do rio Âncora, a sul do núcleo urbano de Vila Praia de Âncora, no concelho de Caminha), a abertura de uma nova foz do rio Âncora, com assoreamento significativo do leito, dando-se, simultaneamente no seu trecho final, a erosão da margem esquerda, e a queda parcial de um passadiço, localizado sobre a duna.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar e avaliar as intervenções adoptadas para a reconstituição da duna do Caldeirão e a recuperação do trecho terminal, fluvio-estuarino, do rio Âncora recorrendo a Soluções Baseadas na Natureza (SbN), que assumem uma abordagem sustentável para reforçar a resiliência costeira.

A metodologia adotada integrou estudos hidrológicos e hidráulicos, análise cronológica da evolução fisiográfica da foz do rio Âncora ao longo das últimas décadas, diagnóstico das dinâmicas fluviais, costeira e dunar, tendo por base o reconhecimento de campo, a evolução do traçado do trecho final do rio Âncora (entre 1958 e 2017), modelos digitais de terreno (MDT) e o desenvolvimento de SbN compatíveis com os instrumentos de ordenamento do território e com os objetivos de preservação dos ecossistemas e proteção de pessoas e bens.

Na dinâmica local da área em estudo sobrepõem-se três componentes principais: dinâmica costeira; fluvial e dunar. Na foz do rio a dinâmica dunar encontra-se na interface entre as outras duas dinâmicas de maior dominância, conjugando processos mais relevantes, mas o seu desenvolvimento determina, fundamentalmente, a fisiografia da foz e da praia.

A avaliação e simulação das dinâmicas fluviais pode-se efetuar de forma relativamente simples, já para as dinâmicas da costa ou do sistema dunar esta avaliação torna-se mais difícil. No estado do mar, além dos fenómenos condicionantes apresentarem conjugações complexas, para se estimar a recorrência de estados extremos de agitação marítima em amplitude e direção de ondulação os dados disponíveis são insuficientes para se poder efetuar um diagnóstico e avaliação mais



3. RISCOS E RESILIÊNCIA COSTEIRA NA CPLP

pormenorizada. Reconhece-se que a rutura do cordão dunar e a abertura da foz a sul, que ocorreu por altura dos temporais de início de fevereiro resultaram de uma conjugação de efeitos extremos e de uma particular fragilidade da duna, por esta se encontrar numa situação mais vulnerável, com menor dimensão, e com a base da duna a sotavento, ameaçada pela erosão na zona côncava do meandro do rio, que se encontrava com caudais fluviais significativamente elevados.

Face à situação em que se encontravam os ecossistemas, costeiro e fluvial, desta área e estando também em causa a segurança de pessoas e bens, particularmente na época balnear, foi desenvolvido um estudo de carácter urgente, em que o conceito de intervenção adotado teve em vista criar as condições para a restauração do leito do trecho terminal do rio Âncora e para a reconstituição da duna do Caldeirão, apoiada numa solução apta a assegurar níveis adequados de eficácia e durabilidade, atendendo à recorrência fenomenológica e à resiliência do meio.

As soluções – para consolidação e fixação de margens e a abertura e escavação de leitos, em ambiente fluvial, e, ao nível da orla marítima, para o reforço e proteção do sistema dunar - foram desenvolvidas de forma integrada e articulada, assentes numa abordagem multidisciplinar, tendo em consideração, entre outros aspectos, o diagnóstico elaborado, custo e preocupações das entidades com jurisdição no território, de modo a que as diferentes acções focadas em SbN permitissem potenciar, estimular e acelerar o processo de regeneração, da forma mais natural possível, e, assim, potenciar a funcionalidade, a resiliência e a sustentabilidade deste território. Na reconstituição / reforço da duna dos Caldeirões, apoiada numa solução de intervenções mistas, de obras de reforço no núcleo da duna é de referir que a alimentação artificial de areia na duna beneficiou da contribuição de areias (volume de sedimentos da ordem dos 104 500 m³) obtidas da dragagem de sedimentos do porto de Vila Praia de Âncora e da plantação de *Ammophila arenaria* ssp. *australis*, proveniente da região

Os resultados obtidos demonstram que as intervenções implementadas permitiram a reposição de cerca de 300 m de cordão dunar e estabilização do trecho terminal do rio Âncora, em aproximadamente 820 m de margem fluvial, conduzindo ao restabelecimento da configuração funcional da foz do rio Âncora e à redução dos processos erosivos nas áreas intervencionadas.

A monitorização realizada durante 6 anos confirmou a robustez das soluções, apesar da ocorrência de vários episódios de agitação marítima significativa. Conclui-se assim que as SbN constituem uma alternativa eficaz e sustentável para a recuperação e consolidação de sistemas costeiros sujeitos a elevada vulnerabilidade, permitindo aumentar a resiliência costeira, a capacidade de adaptação dos ecossistemas e reduzir o risco associado à erosão costeira.

Atendendo à elevada fragilidade dos sistemas dunares e ao carácter extraordinariamente dinâmico do litoral, destaca-se a necessidade de monitorização contínua dos acontecimentos litorais extremos e do correspondente comportamento das obras, e a adaptação das medidas implementadas sempre que necessário, enquadrando as SbN como complemento de outras estratégias de proteção costeira.

Palavras-Chave: erosão costeira; duna do Caldeirão; bioengenharia; resiliência costeira



XII CPGZC

**ATENUAÇÃO DA ENERGIA DAS ONDAS E
PROTEÇÃO COSTEIRA**



AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO DE MODELOS FÍSICOS DE VEGETAÇÃO NA ATENUAÇÃO DA ENERGIA DAS ONDAS: CONTRIBUTOS PARA SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA NA DEFESA COSTEIRA

Maria MENDES¹, José PINHO¹

1. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil / Centro do Território, Ambiente e Construção - CTAC, Guimarães, Portugal, email: pg55760@alunos.uminho.pt, jpinho@civil.uminho.pt

INTRODUÇÃO

As zonas costeiras e estuarinas encontram-se entre os territórios mais vulneráveis aos efeitos das alterações climáticas, em particular devido à subida do nível médio do mar, ao aumento da exposição à agitação marítima e à maior frequência de fenómenos extremos. Neste contexto, a proteção costeira tem vindo a evoluir de uma abordagem predominantemente baseada em estruturas rígidas para soluções mais integradas, flexíveis e ambientalmente sustentáveis. Entre estas, as Soluções Baseadas na Natureza assumem especial relevância, destacando-se os sistemas vegetados costeiros e estuarinos pela sua capacidade de promover dissipação de energia, reduzir a altura das ondas, estabilizar sedimentos e reforçar a resiliência dos ecossistemas.

Apesar do reconhecimento crescente do papel da vegetação na proteção costeira, a sua incorporação em projetos de engenharia continua limitada pela dificuldade em quantificar, de forma robusta, os mecanismos físicos responsáveis pela dissipação da energia das ondas. A transposição dos efeitos observados em sistemas naturais para modelos de cálculo e ferramentas de apoio à decisão exige a obtenção de parâmetros hidráulicos representativos, tais como coeficientes de dissipação, rugosidade equivalente ou relações empíricas entre propriedades da vegetação e atenuação da agitação.

Este trabalho apresentará resultados de uma investigação experimental e numérica em desenvolvimento no âmbito de uma dissertação de mestrado em Engenharia Civil, integrada no projeto MarUMinho, com o objetivo de avaliar o efeito de modelos físicos de vegetação na atenuação da energia das ondas. O estudo procura contribuir para a definição de metodologias laboratoriais e de parametrizações aplicáveis à modelação hidrodinâmica de Soluções Baseadas na Natureza em zonas costeiras e estuarinas.

MÉTODOS

O trabalho em curso envolve a realização de experiências em canal hidráulico, utilizando modelos físicos simplificados de vegetação costeira e estuarina, concebidos para representar diferentes combinações de densidade, rigidez e geometria dos elementos vegetados. A instalação experimental permite a geração controlada de condições de agitação regular e a medição da sua propagação na zona anterior e posterior da faixa vegetada. A Figura 1 apresenta a instalação experimental utilizada nos ensaios em canal hidráulico, incluindo o sistema de geração de ondas e os equipamentos de medição utilizados na aquisição dos dados.

Consideram-se diferentes configurações de vegetação, variando a densidade dos elementos, a sua disposição espacial e as características geométricas representativas da sua interação com o escoamento oscilatório. Para cada configuração, são registadas séries temporais de elevação da superfície livre em várias posições ao longo do canal, permitindo avaliar a evolução espacial da

altura de onda e estimar a redução progressiva da energia associada à propagação sobre a zona vegetada.



Figura 1 – Preparação da instalação experimental no canal hidráulico da Universidade do Minho com sondas de medição HrWallingford e sondas laser especificamente concebidas para o trabalho em curso.

A análise experimental centra-se na comparação entre condições sem vegetação e condições com vegetação, permitindo isolar o efeito dissipativo dos modelos físicos. A partir dos resultados obtidos, são calculadas taxas de atenuação da altura de onda, perdas relativas de energia e indicadores de eficiência da vegetação em função do comprimento da faixa vegetada e das suas propriedades físicas. Esta abordagem permitirá identificar combinações mais eficazes de densidade e geometria, bem como situações em que o aumento da densidade deixa de produzir ganhos proporcionais de dissipação.

Complementarmente, serão realizadas simulações numéricas em CFD para reproduzir as condições laboratoriais e avaliar a capacidade dos modelos numéricos em representar a interação onda-vegetação. A comparação entre resultados experimentais e numéricos permitirá testar diferentes formas de parametrização da resistência induzida pela vegetação, incluindo abordagens baseadas em rugosidade equivalente e em termos adicionais de dissipação. Esta componente procura aproximar os resultados laboratoriais de aplicações práticas em modelos hidrodinâmicos de maior escala.

RESULTADOS

Os resultados experimentais serão processados com o objetivo de avaliar o efeito da presença de modelos físicos de vegetação na redução da altura de onda e da energia propagada ao longo do canal hidráulico. Nesta fase do trabalho, os ensaios encontram-se em desenvolvimento, pelo que os resultados quantitativos finais ainda não estão disponíveis. No entanto, prevê-se que, aquando da realização do congresso, seja possível apresentar uma análise consolidada da evolução espacial da altura de onda, comparando condições sem vegetação com diferentes configurações vegetadas.

Espera-se que a atenuação da agitação dependa da densidade, da geometria e da rigidez dos elementos vegetados, sendo expectável que as configurações com maior ocupação transversal e maior interação com a coluna de água promovam reduções mais significativas da energia das ondas. Serão analisadas as variações da altura de onda ao longo da faixa vegetada, bem como as perdas relativas de energia acumuladas no sentido da propagação, permitindo quantificar a eficiência hidráulica de cada configuração ensaiada.

A comparação entre diferentes densidades de vegetação permitirá avaliar se o aumento do número de elementos vegetados se traduz num acréscimo proporcional da dissipação de energia, ou se existe um limiar a partir do qual os ganhos adicionais se tornam menos expressivos. Esta análise será particularmente relevante para discutir o dimensionamento de Soluções Baseadas na Natureza, uma vez que permitirá relacionar a eficácia hidráulica com critérios de viabilidade construtiva, manutenção e compatibilidade ecológica.



Será também avaliada a influência da rigidez e da geometria dos elementos representativos da vegetação. Prevê-se que modelos mais rígidos possam induzir maior oposição ao movimento orbital associado à onda, promovendo uma dissipação mais evidente, enquanto configurações mais flexíveis poderão apresentar uma resposta dinâmica mais complexa, eventualmente mais próxima do comportamento de determinadas espécies vegetais naturais. Esta comparação deverá contribuir para clarificar a importância da escolha adequada dos modelos físicos quando se pretende representar diferentes tipos de vegetação costeira ou estuarina.

A componente numérica prevista no trabalho permitirá complementar os resultados experimentais através de simulações em CFD, procurando reproduzir as condições laboratoriais e testar formas de parametrização da resistência induzida pela vegetação. No congresso, pretende-se apresentar uma primeira comparação entre os resultados obtidos em laboratório e os resultados numéricos, avaliando a capacidade do modelo para representar a redução da altura de onda ao longo da zona vegetada e para apoiar a definição de parâmetros equivalentes de dissipação ou rugosidade hidráulica.

Pretende-se que o estudo contribua para a demonstração do potencial das Soluções Baseadas na Natureza como complemento ou alternativa parcial a soluções convencionais de proteção costeira. A vegetação será analisada não apenas como elemento ecológico ou paisagístico, mas como componente hidráulica ativa, capaz de contribuir para a dissipação da energia da agitação e para a redução da exposição de margens, praias, sapais e zonas estuarinas vulneráveis.

Palavras-Chave: Soluções Baseadas na Natureza; vegetação costeira; atenuação da energia das ondas; canal hidráulico; modelação CFD; proteção costeira.



MODELAÇÃO DO POTENCIAL DE ATENUAÇÃO DA ENERGIA DAS ONDAS POR UM SISTEMA DE AQUACULTURA

Filipe MIRANDA^{1,2}, Rui COSTA-ANTUNES^{1,2}, Paulo ROSA-SANTOS^{1,2}, Francisco TAVEIRA-PINTO^{1,2},
Tiago FAZERES-FERRADOSA^{1,2}

1. Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 4200-465 Porto, Portugal.
up201706240@up.pt; up202109638@up.pt; prsantos@up.pt; fpinto@fe.up.pt; tferradosa@up.pt

2. Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR), 4450-208 Matosinhos, Portugal

INTRODUÇÃO

As regiões costeiras expostas à agitação marítima estão sujeitas a fenómenos, como a erosão de sedimentos das praias e o galgamento de estruturas de proteção costeira, resultando em inundações. Historicamente, a engenharia tradicional tem-se focado na construção de estruturas “rígidas” de defesa costeira, como quebramares, esporões e defesas aderentes. Adicionalmente, intervenções “suaves”, como a alimentação artificial de praias, também são consideradas. No entanto, os custos de manutenção destas soluções são consideravelmente elevados.

Com a intensificação das alterações climáticas, o aumento do nível médio da água do mar e a maior frequência de eventos extremos, juntamente com o contínuo crescimento populacional nas zonas costeiras, torna-se cada vez mais premente e importante desenvolver estratégias de proteção inovadoras, sustentáveis e economicamente viáveis.

Neste sentido, estruturas de aquacultura offshore surgem como uma possível e interessante solução para os problemas das zonas costeiras. Estas estruturas, além de produzirem um produto economicamente explorável, podem também apresentar características capazes de atenuar a energia das ondas antes de estas chegarem à costa, minimizando assim os riscos associados à agitação marítima. No entanto, estas alternativas apresentam, claro, desafios no que respeita à sua capacidade de sobrevivência à agitação marítima severa.

Este estudo tem como principal objetivo avaliar o potencial de atenuação da energia das ondas através de um sistema de aquacultura de macroalgas. Para esse efeito, foram realizados ensaios em laboratório num canal de ondas e simulações numéricas com recurso ao OpenFOAM.

METODOLOGIA

O trabalho laboratorial foi realizado no canal de ondas do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Foram testadas condições hidrodinâmicas com variação da altura da onda (0.036 m a 0.11 m em escala de modelo), período (1.28 s a 2.56 s) e nível médio do escoamento (0.28 m e 0.34 m). Realizaram-se 104 ensaios com ondas regulares e 56 com ondas irregulares (Miranda *et al.*, 2025).

O coeficiente de transmissão foi estimado através da razão entre a altura da onda transmitida e a da onda incidente. Na Figura 1, encontra-se um esquema do set-up experimental utilizado.

Os resultados numéricos foram validados com os dados resultantes do modelo físico. As ondas foram geradas através do modelo OlaFlow. Para reduzir os custos computacionais, o sistema de aquacultura de algas foi modelado através de um coeficiente de arrastamento médio aplicado a um volume específico (Figura 2), utilizando um método previamente aplicado em situações semelhantes (Maza *et al.*, 2015).

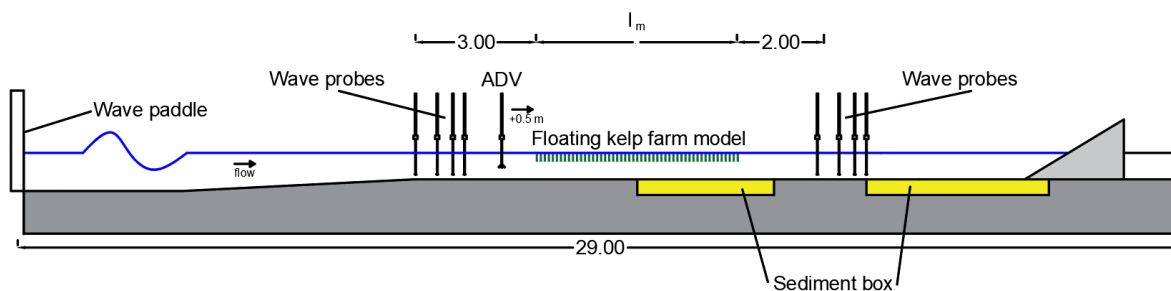


Figura 1. Set-up laboratorial.

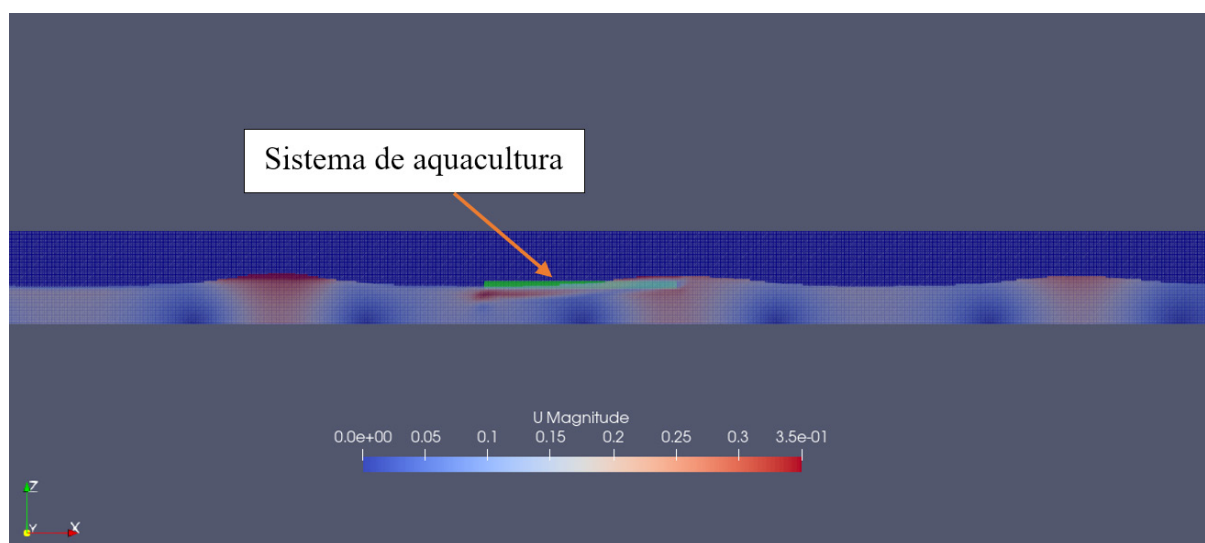


Figura 2. Simulações numéricas CFD à escala do modelo físico (velocidade em m/s).

RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados mostram que um sistema de aquacultura de algas, nas condições testadas, pode reduzir a altura da onda incidente até 44%. Os coeficientes de transmissão variaram entre 0.56 e 0.96 (Miranda *et al.*, 2025). Adicionalmente, a fórmula de Mendez and Losada (2004) para estimar o coeficiente de arrastamento de vegetação aquática, desenvolvida para vegetação fixa ao fundo marinho como mangais e pradarias marinhas, foi adaptada para considerar vegetação localizada junto à superfície.

Foi também possível verificar que o efeito hidrodinâmico na transmissão de ondas através de estruturas de aquacultura de algas flutuantes pode ser modelado numericamente com ferramentas de CFD, utilizando as fórmulas desenvolvidas neste estudo para estimar o coeficiente de arrastamento.

Foi possível também retirar as seguintes conclusões relativas à geometria do sistema de aquacultura:

- O coeficiente de transmissão diminui com o comprimento total do sistema de aquacultura, o número de linhas de cultura, e com a densidade de algas por metro quadrado.
- O coeficiente de transmissão aumenta com a profundidade de instalação do sistema de aquacultura e com o comprimento de onda incidente.

Apesar dos desafios associados à resistência destas estruturas à agitação marítima severa, bem como à sua vulnerabilidade a fenómenos extremos, como ondas de calor que podem comprometer



a sobrevivência das algas, a análise dos resultados indica que estes tipos de sistemas de aquacultura de algas flutuantes podem ser considerados uma alternativa a estruturas “rígidas” como quebramares destacados submersos. Estes sistemas oferecem uma solução inovadora que alia a produção de biomassa marinha à proteção costeira, contribuindo para uma abordagem mais integrada e multifuncional na gestão das zonas costeiras. Além disso, a utilização de estruturas de aquacultura de algas pode promover a biodiversidade marinha e reduzir a dependência de materiais de construção tradicionais, alinhando-se com os princípios da economia circular e da sustentabilidade ambiental.

Palavras-Chave: Hidrodinâmica; CFD; Modelação numérica; Modelação Física; Aquacultura.

BIBLIOGRAFIA

- Maza, M., Lara, J. L., & Losada, I. J. (2015). Tsunami wave interaction with mangrove forests: A 3-D numerical approach. *Coastal Engineering*, 98, 33-54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.01.002>
- Mendez, F. J., & Losada, I. J. (2004). An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields. *Coastal Engineering*, 51(2), 103-118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2003.11.003>
- Miranda, F., Mendes, D., Castro, J. M., Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., & Fazeres-Ferradosa, T. (2025). Physical modelling study on wave damping induced by an idealized floating kelp farm. *Coastal Engineering*, 195, 104648. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104648>



ANÁLISE DO EFEITO DO APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS PARA A PROTEÇÃO COSTEIRA NA ZONA NORTE DE PORTUGAL

Daniel CLEMENTE^{1,2}, Felipe TEIXEIRA-DUARTE², Paulo ROSA-SANTOS^{1,2},
Francisco TAVEIRA-PINTO^{1,2}

1. Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465, Porto, Portugal, up603010@up.pt; ftduarte@fe.up.pt; pjr Santos@fe.up.pt; fpinto@fe.up.pt

2. Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR-LA), Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões, Av. General Norton de Matos s/n, 4450-208, Matosinhos, Portugal

INTRODUÇÃO

De acordo com a Agência Portuguesa do Ambiente, aproximadamente 50% do litoral baixo e arenoso de Portugal continental exibe tendência erosiva de longo prazo [1]. A Norte, existem troços costeiros críticos e zonas sensíveis, como é o caso do troço Ofir-Cedovém e da restinga de Esposende, respetivamente. A região é sujeita a um regime de agitação marítima intenso e dinâmico, dada a exposição direta ao Oceano Atlântico. Esta agitação potencia significativamente a erosão local e os riscos de galgamentos e inundações durante eventos extremos, assim como danos em infraestruturas críticas costeiras. Por outro lado, existem setores que não só beneficiam deste regime, como podem contribuir para mitigar estes efeitos nefastos.

O aproveitamento da energia das ondas é um setor da Economia Azul com projetos de vanguarda a serem implementados em Portugal. Ao recurso abundante, previsível e persistente – cerca de 35 kW/m, em média [2] – junta-se a proximidade a portos marítimos (e.g., Leixões e Viana do Castelo) e o historial vasto de estudos académicos e projetos-piloto (e.g., Pelamis e central do Pico) realizados a nível nacional. A implementação em Portugal de projetos similares permitirá não só a produção de energia renovável, acrescentando ao mix energético atual, mas também explorar o seu potencial de atenuação da agitação marítima local. Como os conversores de energia das ondas (CEOs) absorvem a energia das ondas incidentes, por consequência da conservação da energia as ondas transmitidas a sotamar de um parque de CEOs transportam menos energia. Esta capacidade de funcionamento em modo dual, estudada na literatura [3], pode servir como uma estratégia disruptiva no âmbito da proteção costeira. A mesma pode ser estendida a parques co-localizados de CEOs e eólica offshore [4], uma temática de relevo para Portugal dado o objetivo nacional de atingir uma potência instalada de 2 GW até 2030 [5]. Não obstante, é crucial realizar estudos concretos e definir métricas de referência para avaliar a viabilidade e eficácia desta solução.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta dois estudos realizados recentemente para a costa Norte de Portugal, ambos centrados em Esposende: o primeiro avalia disposições fixas de um parque nearshore e a respetiva eficácia na proteção da restinga de Ofir; o segundo introduz um algoritmo genético multi-objetivo para otimizar a disposição do mesmo parque, tanto para a produção de energia como para a proteção costeira. Através de modelação numérica com software de propagação da agitação marítima e técnicas disruptivas de aglomeração de dados e algoritmos genéticos (AGs), foi possível realizar dois estudos complementares que exploram o potencial da energia das ondas para a proteção costeira, a vários níveis.

CASO DE ESTUDO I: PARQUE DE CEO EM ESPOSENDE

O primeiro caso de estudo incide sobre um parque de 150 WaveRollers nas imediações da restinga de Ofir e do canal de navegação do rio Cávado [6] but complementary applications like coastal



protection are equally pertinent. However, viable commercialization should entice large wave energy farms of significant capacity, which may raise conflicts with coastal industries and/or protected areas. Such matters are addressed in this paper's numerical case study of a dual wave farm for a nearshore Portuguese site. It incorporates two parks of 75 bottom-fixed oscillating flap units, each. The farm's configuration, orientation, layout, and rating were evaluated for varying wave conditions and water levels, based on a statistically representative clustering technique. The farm's location was selected to minimize marine space conflicts. The numerical modelling was executed with SNL-SWAN, from which it was found that a staggered configuration – “W” – would yield better results than an aligned configuration – “III”. The “shadowing” effect of one park onto the other was equally observed, but with limited impact. Greater farm unit spacing and rated power benefited the annual energy production, with values of nearly 345 GWh/yr being achieved. However, the capacity factors were generally greater for lower power ratings, as pondered mean values varied between 0.078 (3.332 MW):

- Foi realizado um levantamento exaustivo de várias condicionantes locais do espaço marítimo, tendo sido evitadas zonas protegidas de recifes rochosos, áreas de dragados e manchas sedimentares estratégicas. O parque foi colocado numa área com profundidades entre os 8 e os 20 m, de acordo com a gama de operação do WaveRoller;
- A base de dados consistiu em séries temporais de altura de onda significativa H_s , período de pico T_p e direção média da onda Dir entre Janeiro de 1990 e Dezembro de 2020 (cerca de 31 anos). Esta foi pré-processada e sujeita a um processo de aglomeração com a técnica K-Means, do qual resultaram 8 estados-de-mar representativos. Várias disposições do parque foram simuladas e comparadas com o modelo numérico SNL-SWAN;
- Os resultados apontam para uma disposição alternada, orientada a 280°, com espaçamento de 1.5 D entre unidades como a de melhor desempenho. A energia produzida anualmente foi estimada em 341 353 GWh/ano para uma potência instalada de 3.332 MW por conversor. O q-factor e o Fator de Capacidade ficaram abaixo de 1 (cerca de 0.64 e 0.08, respetivamente), indicando interação parcialmente destrutiva entre unidades. Ao longo de uma linha de referência a 300 m da costa e com extensão de 3 km, foram identificadas reduções de H_s pontuais superiores a 25% face à condição sem parque, demonstrando o potencial de proteção costeira desta configuração.

CASO DE ESTUDO II: OTIMIZAÇÃO DA DISPOSIÇÃO EM ESPOSENDE

O segundo caso de estudo aplica um AG multi-objetivo ao mesmo parque de 150 WaveRollers, em Esposende, com o objetivo de otimizar a sua disposição [7]. A área de estudo foi expandida com os mesmos critérios do Caso I, mas os CEOs passam a ter posicionamento livre dentro do polígono, condicionado apenas pela distância mínima entre unidades.

- A base de dados e os 8 estados-de-mar representativos, obtidos por K-Means no Caso I, foram reutilizados diretamente, e o modelo SNL-SWAN foi integrado no ciclo iterativo do AG. O processo de otimização foi executado com dois objetivos simultâneos: maximizar a eficiência de captura de energia (*q-factor*) e controlar a atenuação da agitação na zona de interesse, quantificada pelo índice HRA (Redução da Altura de Onda Significativa na área de interesse). A seleção do arranjo ótimo em cada cenário foi suportada pelo índice WLA (Avaliação da disposição de parque de energia das ondas) [8], que combina e pondera ambas as métricas numa escala normalizada de 0 a 1.
- Foram considerados dois cenários. No cenário de proteção costeira, o AG maximizou simultaneamente o q-factor (0.80) e o HRA (18.8%), um aumento de 26% e 40%, respetivamente, face à disposição fixa do Caso I. No cenário de impacto mínimo, o AG

maximizou o q -factor (0.78) enquanto minimizava o HRA (12.8%), melhorando a produção em 24% e reduzindo o impacto costeiro em 7% face ao caso fixo, Figura 1.

Em ambos os cenários, o AG superou a disposição fixa inicial em produção de energia, confirmando que a otimização contínua da disposição apresenta maior potencial de aplicação que as abordagens de grelha pré-definida.

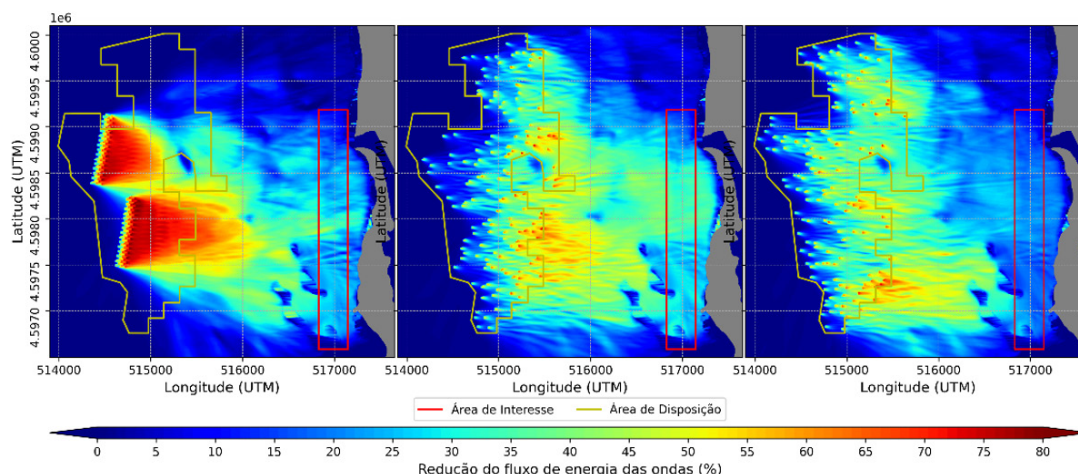


Figura 1 – Redução do fluxo de energia das ondas (%) em parques de CEOs: otimizado para proteção costeira (esquerda), otimizado para impacto mínimo (centro), e melhor disposição fixa do caso I (direita) [7].

Os dois estudos demonstram que parques de CEOs nearshore em Esposende têm potencial real tanto para produção de energia renovável como para proteção costeira passiva da restinga de Ofir e do canal do Cávado. A introdução da estrutura de otimização com AG representa relevância metodológica ao explorar continuamente o espaço de soluções possíveis. Assim, ultrapassa as limitações das disposições fixas e adapta o arranjo do parque aos objetivos específicos de gestão costeira. As métricas incluídas no WLA constituem referências quantitativas transferíveis para uma vasta gama de casos pelo mundo.

REFERÊNCIAS

- [1] Pinto CA, Silveira TM, Teixeira SB. Beach nourishment practice in mainland Portugal (1950–2017): Overview and retrospective. *Ocean & Coastal Management* 2020;192:105211. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105211>.
- [2] Ramos V, López M, Taveira-Pinto F, Rosa-Santos P. Influence of the wave climate seasonality on the performance of a wave energy converter: A case study. *Energy* 2017;135:303–16. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.080>.
- [3] Abanades J, Flor-Blanco G, Flor G, Iglesias G. Dual wave farms for energy production and coastal protection. *Ocean & Coastal Management* 2018;160:18–29. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.03.038>.
- [4] Teixeira-Duarte F, Rosa-Santos P, Taveira-Pinto F. Multi-objective optimization of co-located wave-wind farm layouts supported by genetic algorithms and numerical models. *Renewable Energy* 2025;122362–122362. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2025.122362>.
- [5] Governo de Portugal. PLANO NACIONAL ENERGIA E CLIMA 2021-2030 (PNEC 2030) - Atualização/Revisão. Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG); 2024.
- [6] Clemente D, Ramos V, Teixeira-Duarte F, Taveira-Pinto FVC, Rosa-Santos P, Taveira-Pinto F. Assessment of electricity production and coastal protection of a nearshore 500 MW wave



farm in the north-western Portuguese coast. *Applied Energy* 2025;379:124950. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124950>.

- [7] Teixeira-Duarte F, Rosa-Santos P, Taveira-Pinto F. Optimizing Nearshore Wave Energy Farms: A Multi-Objective Genetic Algorithm Framework for Power Capture and Coastal Protection 2025. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5388377>.
- [8] Teixeira-Duarte F, Ramos V, Rosa-Santos P, Taveira-Pinto F. Multi-objective decision tool for the assessment of co-located wave-wind offshore floating energy parks. *Ocean Engineering* 2024;292:116449–116449. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2023.116449>.

Palavras-Chave: Energia das Ondas; Propagação da Agitação Marítima; Algoritmos Genéticos; SNL-SWAN; Modelação Numérica.



XII CPGZC

MONITORIZAÇÃO E GESTÃO COSTEIRA



PORTUGAL LITORÂNEO: MUDANÇAS COSTEIRAS, POLÍTICAS E SOCIAIS

Luisa SCHMIDT, Pedro PRISTA

O impacto crescente das alterações climáticas sobre a orla costeira em Portugal tem vindo a ser progressivamente estudado, sobretudo quanto à sua expressão geofísica nas dinâmicas de erosão associadas à subida do nível médio do mar e das suas consequências, tais como a perda de extensão territorial costeira, a afetação ambiental, a destruição de estruturas edificadas e a decisão sobre intervenções técnicas de emergência.

Associadas a estas abordagens, as dimensões da governança costeira têm constituído um forte desafio tanto de integração disciplinar como de oportunidade, já que nela se trata de medidas de adaptação que se impõem rápidas e muito exigentes na sua sustentabilidade social e de justiça ambiental. A zona costeira concentra a maior parte da população e das atividades económicas do país.

Em todos os cenários reconhecidos as previsões para o futuro próximo e distante apontam um agravamento da situação da orla costeira em Portugal. O futuro das populações costeiras - seja enquanto residentes, seja enquanto utilizadoras ou detentoras de interesses, requer a criação e implementação de novos mecanismos de governança.

Com efeito, as projeções da subida do nível médio do mar (NMM) têm vindo a apresentar cenários cada vez mais gravosos em sucessivos relatórios do International Panel Intergovernmental sobre Alterações Climáticas (IPCC). Em conjunto com a erosão costeira, o NMM irá exacerbar os impactos de tempestades e inundações costeiras. De igual modo a Agência Europeia do Ambiente alerta no seu Relatório de 2024 para o elevado risco que a Península Ibérica apresenta face aos eventos climáticos costeiros extremos (EEA, 2024). Por seu lado, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) tem também divulgado informação preocupante sobre a vulnerabilidade costeira do país (APA, 2025); e o Roteiro Nacional de Adaptação (RNA 2100) de 2024 considera a afetação costeira uma das mais preocupantes consequências do impacto das alterações climáticas no país (Soares *et al* 2024).

Nos últimos anos Portugal sofreu um conjunto de eventos costeiros extremos, expondo assim o risco crescente em que se encontram várias zonas costeiras, as quais implicam investimentos públicos cada vez mais onerosos - seja no reforço dos esporões, seja na alimentação das praias através da reposição de areia, seja ainda nos danos causados sobre as edificações afetadas. No início de 2026 registou-se um ‘comboio de tempestades’ com destaque para a devastadora Kristin, as quais geraram inúmeras afetações costeiras originando 147 intervenções, mobilizando até agora 84 milhões de euros.

Num parecer recente sobre a sustentabilidade das zonas costeiras, o Conselho Nacional do Ambiente e do Desenvolvimento Sustentável traça um panorama sobre a evolução das zonas costeiras desde a sua ocupação crescente até às dificuldades de governança e aponta um conjunto de medidas de implementação urgente convocando uma abordagem científica interdisciplinar, incluindo as dimensões jurídica e a económica (CNADS, 2026).

Contudo, apesar de todo o conhecimento e informação sobre esta complexa e arriscada condição territorial ter beneficiado de um acentuado incremento nos últimos anos, as suas dimensões sociais continuam carentes de um aprofundamento que dê conta da complexidade das dinâmicas que ocorrem na linha costeira.



Esta situação defronta-se cada vez mais com imperativos de mudança rápida e profunda, o que por sua vez impõe dinâmicas participativas muito exigentes que assegurem a sanidade democrática, a justiça social e a eficácia dos processos transformativos. Uma governança adaptativa para a sustentabilidade nestas zonas litorâneas em acelerada mudança, requer abordagens novas e/ou experimentais por parte das ciências sociais, tal como já evidenciam alguns estudos levados a cabo em diferentes zonas do país particularmente afetadas (Schmidt *et al* 2013; Guerra *et al* 2021; Lima *et al*, 2021).

Nesta comunicação analisamos de forma integrada a complexidade social e geofísica da linha costeira do país, levando em conta as tensões existentes e os interesses conflituantes sobre os riscos, a economia e a sustentabilidade, tendo em vista uma abordagem alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e o Acordo de Paris. Apontamos ainda a instalação de mecanismos inovadores de governança, de modo a envolver as partes interessadas locais em soluções justas e viáveis de adaptação face a um conjunto de pressões ambientais, económicas e sociais sem precedentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APA. (2025). *Ambiente Marinho e Costeiro: uma Linha de Costa em Situação de Erosão*. <https://rea.apambiente.pt/content/linha-de-costa-em-situação-de-erosão>.

APA. (2025). *Relatório do Estado do Ambiente 2025 – REA 2025*.

CNADS - Conselho Nacional do Ambiente e do Desenvolvimento Sustentável. (2026). *Reflexão do CNADS sobre Gestão Sustentável da Zona Costeira*.

European Environment Agency (2024). Environmental Statement Report 2024.

Guerra, J., Schmidt, L. & Penha Lopes, G. (2021). “O caso ClimAdaPT.Local: capacitação e ação climática em Portugal”, *Ambiente & Educação*, Vol. 25, n.º 3, pp. 9-30, ISSN 1413-8638.

Lima, M., Alves, F., Marto, M. e Coelho, C. (2021). Medidas de mitigação e adaptação à erosão costeira e os efeitos das alterações climáticas. *Revista dos Recursos Hídricos*, Vol. 42, N.º 1, 61, APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh42n1-cti7

Schmidt, L., Prista, P., Saraiva, T., O’Riordan, T., & Gomes, C. (2013b). Adapting governance for coastal change in Portugal. *Land Use Policy*, 31, 314–325. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.07.012>

Soares, P. M., Lima, M., Cardoso, R., Nogueira, D., Lemos, G., Bento, V., & Trigo, R. (2024). *National roadmap for adaptation 2100: Portuguese territorial climate change vulnerability assessment for XXI century – Report WP2A: Climate projections, extremes, and indices (Mainland Portugal)*. Agência Portuguesa do Ambiente. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13915540>



MONITORIZAR PARA ANTECIPAR: DA OBSERVAÇÃO COSTEIRA À INTELIGÊNCIA TERRITORIAL

José Luís PINHO¹, Helena GRANJA²

1. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil / Centro do Território, Ambiente e Construção - CTAC, Guimarães, Portugal, email: jpinho@civil.uminho.pt

2. Universidade do Minho, Departamento de Ciências da Terra, Braga, Portugal, Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR), Universidade do Porto, Portugal. email: helenapgranja@gmail.com

INTRODUÇÃO

A monitorização da faixa costeira é indispensável para avaliar a respetiva evolução e apoiar decisões de planeamento e proteção. A definição prévia de locais, metodologias e calendários de monitorização é essencial para assegurar coerência técnica, continuidade temporal, comparabilidade dos dados e viabilidade operacional. Essa priorização, naturalmente condicionada por critérios de vulnerabilidade, risco, disponibilidade de recursos e enquadramento contratual, não elimina, contudo, o interesse de programas locais complementares. Estes podem acrescentar uma leitura territorial de proximidade em setores menos ocupados ou menos intervencionados, que, por integrarem as mesmas células sedimentares, funcionam como áreas de controlo morfodinâmico e podem revelar sinais antecipados de alteração do sistema praia-duna.

O trecho costeiro a sul da Praia de Mira constitui um caso particularmente elucidativo para discutir essa articulação entre monitorização nacional e monitorização local complementar. Apesar da reduzida ocupação direta em vários setores, a sua monitorização permite comparar zonas influenciadas por obras de defesa, áreas associadas a infraestruturas e trechos arenosos com menor intervenção. Esta leitura integrada é essencial para compreender gradientes de erosão, efeitos a barlar e sotamar e respostas diferenciadas do sistema praia-duna.

Este trabalho apresenta resultados de um programa de monitorização desenvolvido em Mira, iniciado com a situação de referência de 2008 e prolongado por campanhas sucessivas até ao presente. O principal objetivo é discutir como estruturar uma monitorização costeira operacional, capaz de integrar inspeção visual, levantamentos topográficos, levantamentos topo-hidrográficos e caracterização sedimentar, produzindo informação comparável no tempo e no espaço, útil para a decisão sobre a gestão territorial. Defende-se que a monitorização costeira não deve limitar-se aos setores com risco imediato mais elevado, nem à simples medição periódica da posição da linha de costa, devendo constituir uma infraestrutura contínua de conhecimento para apoiar a gestão costeira nacional e municipal.

PROGRAMA DE MONITORIZAÇÃO

O programa local analisado acompanha a evolução morfodinâmica da faixa costeira adjacente à unidade aquícola de Mira, mas a sua estrutura metodológica é transferível para outros setores arenosos expostos da costa portuguesa. A sua principal mais-valia resulta da combinação de observação de campo, levantamentos topográficos, levantamentos topo-hidrográficos e caracterização sedimentar, permitindo interpretar a evolução do sistema praia-duna em diferentes contextos de ocupação e intervenção.

A primeira componente corresponde à inspeção visual periódica de um segmento costeiro que se estende desde o esporão norte da Praia de Mira até cerca de 3 km a sul da área de implantação da unidade aquícola. O trecho foi dividido em setores de 500 m, permitindo registar, de forma repetível, o tipo e estado do perfil praia-duna, a regularidade da crista dunar, microarribas, blowouts,



regueiras, zonas de galgamento, estado da berma, presença de sedimentos grosseiros e registo fotográfico georreferenciado. Esta observação é particularmente importante porque identifica sinais morfológicos de curta duração, frequentemente associados a temporais ou a mudanças rápidas de fatores que intervêm sobre a praia, que possam não ser imediatamente registados através de levantamentos topográficos espaçados.

A segunda componente integra levantamentos topográficos sistemáticos, realizados em nove perfis transversais e num perfil longitudinal sobre a crista da duna frontal. Os perfis foram distribuídos de modo a representar setores a barlar e sotamar do esporão norte, a zona intermédia entre a praia urbana e a unidade aquícola, os alinhamentos das condutas de captação e emissários, e setores menos ocupados a sul. A repetição dos mesmos alinhamentos, com equipamento DGPS/GNSS e referência altimétrica coerente, permite quantificar recuos, variações de largura da praia, declives, cotas da crista dunar e deslocamentos de cotas de referência relevantes para a avaliação de erosão, galgamento e exposição de infraestruturas.

A terceira componente corresponde aos levantamentos topo-hidrográficos da plataforma submersa, realizados com sistema multifeixe em campanhas selecionadas, permitindo caracterizar a batimetria de referência e acompanhar alterações dos fundos adjacentes à praia emersa. A quarta componente, de elevado valor interpretativo, corresponde à recolha e análise dimensional de sedimentos em posições-tipo ao longo dos perfis. Embora tenha sido suspensa nas campanhas mais recentes, esta componente permitiu relacionar morfologia, transporte e disponibilidade sedimentar, acrescentando informação que não é substituída pela simples medição topográfica.

Os dados recolhidos são integrados em sistema de informação e interpretados por comparação com a situação de referência e com o historial de campanhas. Esta abordagem transforma observações e medições em indicadores úteis para a gestão, incluindo a posição da arriba de erosão, a evolução da largura da praia, a variação da cota da crista dunar, a resposta de setores protegidos por esporões, a evolução de trechos a sotamar e a exposição progressiva de infraestruturas.

RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados de monitorização de Mira evidenciam uma evolução morfodinâmica espacialmente diferenciada, expressa na comparação temporal dos perfis transversais, na variação da largura da praia, na evolução da arriba de erosão e na alteração da cota da crista dunar. Os perfis localizados nos setores intermédios e a sul registaram recuos máximos da frente dunar/arriba de erosão da ordem de 50 m, enquanto o setor a norte apresenta estabilidade relativa.

O período de monitorização é também relevante para avaliar a eficácia de obras de defesa costeira. Os resultados mostram que os esporões da Praia de Mira têm contribuído para a manutenção da praia urbana e da sua estabilidade relativa. Esta constatação não dispensa a avaliação dos efeitos a sotamar, nem permite generalizar soluções rígidas a outros contextos. Mostra, contudo, que o debate sobre obras costeiras deve ser suportado por evidência local de longa duração, e não apenas por posições genéricas sobre a sua conveniência ou rejeição.

Do ponto de vista metodológico, destacam-se duas lições principais. A inspeção visual estruturada deve ser valorizada como componente obrigatória dos programas locais, pela sua capacidade de identificar microformas, alterações da berma, sinais recentes de galgamento, exposição de sedimentos grosseiros e micro-arribas de erosão. A caracterização sedimentar deve também ser recuperada como complemento interpretativo, pelo menos em campanhas de referência, pós-temporal ou de reavaliação plurianual, dado o seu contributo para compreender transporte, disponibilidade sedimentar e resposta morfossedimentar da praia.

Conclui-se que a monitorização costeira deve ser entendida como uma infraestrutura contínua de conhecimento territorial. À escala nacional, as entidades responsáveis devem assegurar coerência metodológica, qualidade dos dados, continuidade das séries e disponibilização pública da informação. À escala local, os municípios podem acrescentar capacidade de leitura territorial e

resposta operacional, articulando os dados nacionais com observação de proximidade, campanhas complementares após temporais, gestão balnear, proteção civil e atualização dos instrumentos de planeamento

Palavras-Chave: monitorização costeira; sistema praia-duna; morfodinâmica costeira; gestão costeira.

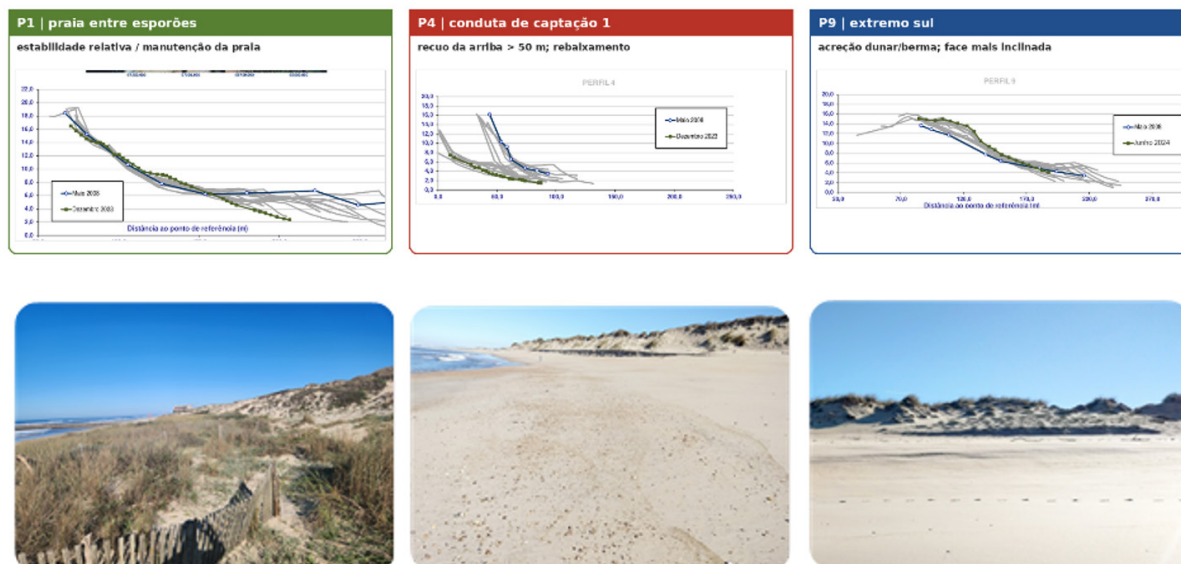


Figura 1 - Integração de métodos no programa de monitorização da faixa costeira de Mira: comparação temporal dos perfis 1, 4 e 9, e exemplos de observação visual de campo, incluindo influência dos esporões e formação de micro-arribas num trecho intermédio e na extremidade sul.



1

NOVAS TECNOLOGIAS NA MONITORIZAÇÃO E GESTÃO DE SISTEMAS AQUÁTICOS: DIGITALIZAÇÃO E ROBÓTICA DE ENXAME

Ana BIO¹, Isabel IGLESIAS¹, Rodrigo OZÓRIO¹, Francisco ARENAS¹, Rui ROCHA²,
Gonçalo FERREIRA³, Micael S. COUCEIRO⁴

1. CIIMAR/CIMAR LA, Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental, Matosinhos, Portugal, anabio@ciimar.up.pt, iiglesias@ciimar.up.pt, rodrigo.ozorio@ciimar.up.pt, farenas@ciimar.up.pt,

2. ISR Coimbra, Dep. Eng.ª Eletrotécnica e de Computadores, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, rprocha@isr.uc.pt

3. Riamaris, Lda., Matosinhos, Portugal, info@riamaris.com

4. Ingeniarius, Lda., Alfena, Portugal, micael@ingeniarius.pt

ENQUADRAMENTO

A transição digital e ambiental da Economia Azul é essencial para alavancar a sua eficiência, competitividade e sustentabilidade, sobretudo em zonas costeiras e estuarinas onde se cruzam pressões ambientais, atividades económicas estratégicas e desafios de governação. Neste contexto, a inovação em setores chave, tais como portos, marinas, e aquicultura, passa por (i) sensorização e recolha de dados em tempo real, (ii) processamento com técnicas de aprendizagem automática e inteligência artificial, e (iii) gémeos digitais que integram observações e modelos para apoiar decisões preditivas e intervenções mais eficazes.

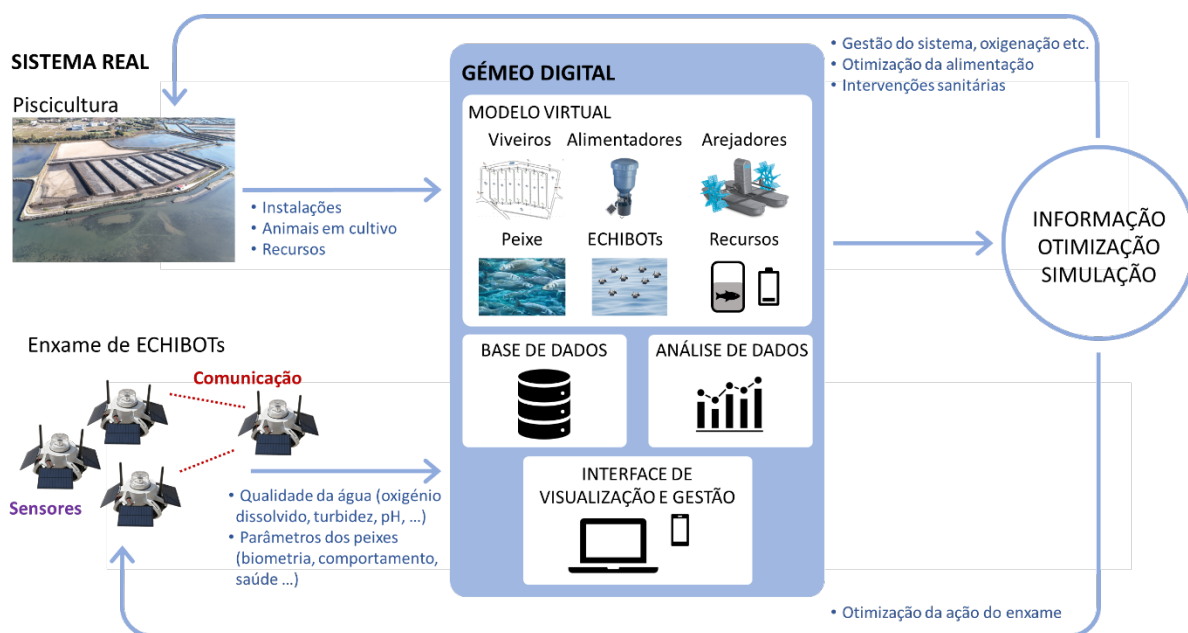
O PROJETO REMORA

REMORA é um projeto de I&D em copromoção (Portugal 2030/COMPETE 2030) inovador que integra robótica de enxame, inteligência artificial (IA) e tecnologias de gémeos digitais para melhorar a monitorização e gestão de sistemas aquáticos. Propõe-se a utilização de enxames de robôs autónomos de baixo custo (os ECHIBOTs), equipados com diversos sensores, para uma monitorização distribuída e precisa, em tempo real, de parâmetros de qualidade de água e de outros componentes do sistema aquático. O enxame robótico permite: (i) observações abrangentes no espaço e no tempo; (ii) monitorização dinâmica, com distribuição dos robôs adaptada à distribuição espaciotemporal das variáveis de interesse (e.g., agregação de robôs em focos de poluição); e (iii) comunicação de medições/informação em tempo real para uma interface enxame-utilizador em formato de gémeo digital. O gémeo digital constitui uma reprodução virtual do sistema real, incluindo todos os componentes físicos relevantes, recursos e os próprios robôs. Ele é treinado e funciona com base nos dados obtidos em tempo real e em modelos computacionais, que permitem: uma melhor compreensão do sistema e da sua dinâmica, uma gestão mais precisa, eficiente e sustentável, a antecipação de problemas e a otimização de intervenções através da simulação de cenários antes da sua implementação.

As soluções propostas serão implementadas e demonstradas em duas unidades de economia azul - numa marina e numa piscicultura - de forma a avaliar o seu desempenho e impacto económico em contexto real. A validação em ambiente costeiro/estuarino decorrerá na Marina do Freixo (estuário do Douro), enquanto a validação em aquicultura decorrerá nas Marinhas Barrigueira (Ria de Aveiro). Na marina, o foco é a segurança, de navegação, das instalações e dos utilizadores, e o ambiente. O enxame de robôs equipados com sensores de parâmetros físico-químicos, câmara ótica e sonar, monitoriza a qualidade da água detetando possíveis focos de poluição, o movimento na marina, o fundo e fauna e flora (locais e invasoras). Na aquicultura, o foco é a qualidade da água, o ciclo alimentar e de crescimento, e o bem-estar dos animais em cultivo. Aqui os robôs monitorizam a

qualidade da água, particularmente em termos de oxigénio dissolvido e turbidez, e o crescimento e comportamento dos peixes, podendo ainda intervir ativamente no bem-estar animal através da emissão de sons acalmantes. A figura mostra um esquema da aplicação integrada de robótica de enxame e gémeo digital proposta no âmbito do REMORA.

O projeto visa, deste modo, contribuir para a digitalização da economia azul, tornando os processos mais eficientes, seguros e ambientalmente sustentáveis. No primeiro semestre do projeto, foram já desenvolvidos protótipos iniciais das plataformas robóticas, os ECHIBOTs, e uma versão preliminar do gémeo digital em Unity, integrada com o sistema operativo robótico (ROS2), permitindo ensaios rápidos em simulação e preparação de campanhas de validação no terreno.



Esquema da solução proposta para a gestão de uma piscicultura.

Palavras-Chave: monitorização aquática; robótica de enxame; gémeo digital; digitalização

AGRADECIMENTOS:

Este trabalho foi apoiado pelo projeto REMORA (COMPETE2030-FEDER-01429400), co-financiado pela União Europeia através dos programas COMPETE 2030 e Portugal 2030, e pelos fundos estratégicos UID/04423/2025, UID/PRR/04423/2025 e LA/P/0101/2020, através de fundos nacionais da FCT- Fundação para a Ciência e Tecnologia e europeus do Mecanismo de Recuperação e Resiliência.



AMOSTRAGEM ADAPTATIVA COM AUVS USANDO DESCRITORES DE REGIMES DE TEMPERATURA NO CANHÃO DA NAZARÉ

Pedro Marques LOBÃO¹, João BORGES DE SOUSA², Renato MENDES³

1. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (LSTS),
up202107522@up.pt

2. Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (LSTS), Porto, Portugal, jtasso@fe.up.pt

3. Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (LSTS), Porto, Portugal, rpsm@lsts.pt

INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

A oceanografia operacional depende de previsões e nowcasts fiáveis para apoiar a monitorização ambiental e a tomada de decisão em zonas costeiras. Contudo, as observações in situ continuam escassas devido ao custo, à logística e à cobertura limitada de campanhas com navios e infraestruturas fixas. Os veículos autónomos subaquáticos (AUVs) podem complementar estas redes de observação, recolhendo medições de elevada resolução ao longo de trajetórias planeadas. Ainda assim, a autonomia energética limitada, as comunicações intermitentes, as restrições de segurança e a forte variabilidade espacial e temporal dos processos costeiros tornam a escolha de onde amostrar um problema de decisão sob incerteza.

Este trabalho é motivado pelo contexto do Canhão da Nazaré, uma região costeira complexa onde a batimetria, a circulação e os gradientes térmicos podem gerar estruturas espaciais heterogéneas. Em abordagens de amostragem adaptativa orientadas por modelos, mapas de desvio-padrão (STD) podem ser usados como mapas de recompensa, guiando os AUVs para regiões onde a previsão é mais incerta. No entanto, a incerteza não representa necessariamente toda a organização espacial do campo de temperatura previsto, incluindo frentes, gradientes, fronteiras e regimes térmicos recorrentes.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar se descritores espaciais derivados de regimes recorrentes de temperatura podem complementar um planeador adaptativo orientado por incerteza, sem substituir o STD como referência operacional. A questão central é saber se informação estrutural sobre o campo de temperatura pode alterar as trajetórias de forma interpretável, mantendo simultaneamente o comportamento de procura de regiões incertas.

METODOLOGIA

A metodologia proposta combina uma etapa offline de aprendizagem de regimes com uma etapa de planeamento diário. Na etapa offline, são usados 370 mapas históricos de temperatura de superfície numa região de interesse do Canhão da Nazaré. Estes mapas são pré-processados numa grelha comum e representados através de representações compactas inspiradas em modelos de amostragem adaptativa em robótica marinha. O processo inclui extração de patches, dictionary learning, codificação esparsa e agrupamento hierárquico de Ward, resultando numa biblioteca de seis classes de regimes de temperatura de campo completo.

Cada classe é representada por um protótipo espacial. A partir destes protótipos são extraídos descritores compatíveis com o planeador, incluindo mapas de proximidade a fronteiras, zonas representativas, regiões frias e quentes e mapas de interesse. Estes descritores não são interpretados

como rótulos independentes por célula, mas sim como informação espacial derivada do padrão recorrente associado a cada classe.

Na etapa de planeamento, o campo de temperatura previsto para um determinado dia é usado apenas para seleccionar a classe mais próxima da biblioteca. Depois, os descritores do protótipo correspondente são recuperados e combinados com o mapa STD do mesmo dia. A recompensa de base é dada por $R_{base}(s) = STD_{norm}(s)$, enquanto as formulações enriquecidas usam uma combinação ponderada entre STD e um descritor normalizado. O planeador existente é mantido sem alterações, sendo modificados apenas os mapas de recompensa fornecidos como entrada.

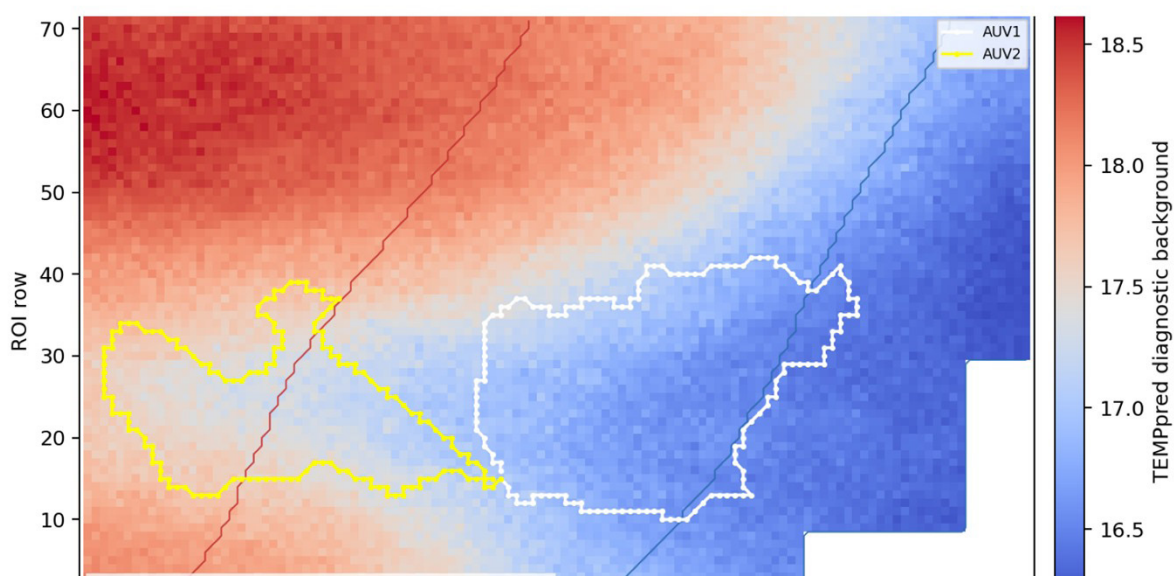


Figura 1. Planeamento multi-AUV enriquecido por descritores de regimes. As trajetórias são comparadas sobre um campo diagnóstico, enquanto o TEMPpred é usado no método apenas para seleção da classe de regime.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As experiências foram realizadas em cenários com um e múltiplos AUVs, usando a mesma região de interesse, máscara operacional, grelha e duração de missão. A comparação entre o planeamento baseado apenas em STD e as formulações enriquecidas avaliou a retenção de STD, a resposta aos descritores, a geometria das rotas, a sobreposição entre veículos, o tempo de execução e métricas externas de variabilidade recente.

Os resultados indicam que os descritores derivados de protótipos podem alterar o comportamento do planeador de forma interpretável, sobretudo em casos com estrutura de fronteira clara. Em algumas configurações, as rotas enriquecidas preservaram uma fração elevada da recompensa de incerteza, ao mesmo tempo que se tornaram mais sensíveis a zonas de fronteira ou regiões representativas do regime térmico selecionado. Nos testes com múltiplos AUVs, mapas específicos por veículo incentivaram alguma especialização espacial, embora a redução robusta de sobreposição exija mecanismos explícitos de coordenação ou penalização de redundância.

A interpretação dos resultados é conservadora. O trabalho não demonstra melhoria direta da assimilação de dados, da qualidade de previsão ou da redução de incerteza do modelo oceânico. Em vez disso, fornece uma cadeia reprodutível para introduzir informação espacial consciente de



regimes em mapas de recompensa para planeamento AUV e para avaliar como essa informação modifica as trajetórias geradas.

CONCLUSÕES

A principal contribuição é uma metodologia reprodutível que liga a descoberta de regimes térmicos recorrentes à construção de mapas de recompensa para amostragem adaptativa com AUVs. O STD permanece como referência operacional, enquanto os descritores de regimes fornecem contexto espacial adicional sobre gradientes, fronteiras e zonas representativas. Esta abordagem pode apoiar estratégias de amostragem mais interpretáveis em zonas costeiras heterogéneas, constituindo um passo intermédio para futuros estudos que liguem diretamente o planeamento das trajetórias ao impacto na assimilação de dados e na previsão oceânica.

Palavras-Chave: amostragem adaptativa; AUV; regimes de temperatura; planeamento orientado por incerteza; Canhão da Nazaré.



XII CPGZC

**FERRAMENTAS PARA PREVISÃO E
MONITORIZAÇÃO COSTEIRA**



COASTA: VÍDEO-MONITORIZAÇÃO E DEMOCRATIZAÇÃO DO HIDRALERTA PARA A GESTÃO DO RISCO COSTEIRO EM PORTUGAL

Larize LIMA^{1,2}, Filomena MARTINS¹, Conceição FORTES², Lílíana PINHEIRO²

1. Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro (Portugal), larizelima@ua.pt, filomena@ua.pt.

2. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa (Portugal), llima@lnec.pt, jfortes@lnec.pt, lpinheiro@lnec.pt.

RESUMO

Esta comunicação tem como objetivo apresentar o plano de trabalhos do projeto de doutoramento “COASTA: Comunidades Costeiras Alertas, Seguras e Tecnologicamente Ativas” (FCT- Portugal, 2025.01605.BDANA), destacando o seu enquadramento conceptual, a sua proposta metodológica e a sua relevância para a gestão do risco costeiro em Portugal.

A intensificação dos impactos costeiros associados às alterações climáticas, designadamente galgamentos oceânicos, inundações e erosão, reforça a necessidade de instrumentos de antecipação e apoio à decisão cada vez mais robustos, operacionais e socialmente inclusivos. Desafios como a literacia tecnológica e os limites éticos da tecnologia na tomada de decisão condicionam o desenvolvimento de políticas públicas com viés mais tecnicista. Entretanto, a digitalização, a vídeo-monitorização remota e a aplicação de inteligência artificial (IA) e/ou machine learning (ML) emergem como vetores relevantes para a modernização da gestão do risco em zonas costeiras. A literatura recente demonstra que o valor destas tecnologias contribuiu para o aumento da capacidade preditiva, mas a sua grande mais valia decorre da sua articulação com processos de governação, comunicação do risco, confiança dos utilizadores e integração institucional. É, neste enquadramento, que se inscreve o projeto de doutoramento “COASTA: Comunidades Costeiras Alertas, Seguras e Tecnologicamente Ativas”.

O projeto parte de uma lacuna simultaneamente científica e operacional no contexto português. O sistema HIDRALERTA, desenvolvido e operado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), é um sistema de previsão, alerta e avaliação do risco de galgamentos costeiros, com aplicação em diferentes contextos portuários e municipais. A sua utilização, entretanto, permanece predominantemente restrita a entidades técnicas e operacionais, limitando o seu potencial enquanto ferramenta de comunicação pública do risco, reforço da resiliência comunitária e suporte à formulação e implementação de políticas públicas territoriais.

O COASTA propõe, assim, a evolução do HIDRALERTA de um sistema técnico de apoio especializado para uma infraestrutura pública de alerta precoce costeira, assente em princípios de ciência cidadã, democratização da informação e governação adaptativa. A investigação tem como caso-piloto a Praia da Vitória, na ilha Terceira (Açores), território particularmente relevante por reunir três condições estratégicas: implementação prévia do HIDRALERTA, existência de sistema de vídeo-monitorização e articulação com a Proteção Civil Municipal. O objetivo central consiste em desenvolver um modelo operacional e institucional que permita validar, ampliar, automatizar e abrir ao domínio público a informação produzida pelo HIDRALERTA, reforçando a sua utilidade enquanto instrumento de gestão do risco costeiro em Portugal.

Do ponto de vista metodológico, o projeto estrutura-se em cinco fases complementares. Numa primeira fase, proceder-se-á ao diagnóstico das necessidades dos utilizadores, da perceção do risco e dos níveis de confiança associados a ferramentas preditivas de risco costeiro. Seguidamente, será realizada a validação e calibração do HIDRALERTA com recurso à vídeo-monitorização em



tempo real, permitindo aferir a correspondência entre os alertas emitidos e os eventos efetivamente observados. Numa terceira fase, será desenvolvido um módulo de reconhecimento automático de níveis de alerta com base em técnicas de ML aplicadas à análise de imagem, com vista à deteção e classificação de galgamentos e inundações. Posteriormente, será concebida e testada uma interface digital pública, destinada à disponibilização de alertas em tempo real e protocolos de segurança associados. Finalmente, o projeto prevê a formalização de propostas de integração do sistema em instrumentos municipais de planeamento, proteção civil e gestão territorial, bem como a definição de orientações para a replicação do modelo noutros territórios costeiros.

A relevância da proposta ancora-se em três contributos principais. Em primeiro lugar, responde a uma lacuna ainda insuficientemente explorada na literatura e na prática institucional portuguesa: a integração automatizada entre vídeo-monitorização, IA/ML e acesso público em sistemas operacionais de alerta precoce costeiro. Em segundo lugar, reforça o HIDRALERTA enquanto ativo estratégico nacional, ampliando a sua aplicabilidade técnica, social e político-institucional. Em terceiro lugar, contribui para a discussão sobre o papel da tecnologia na governação costeira, defendendo que a inovação digital produz maior impacto quando orientada para a transparência, a participação informada e a operacionalização de políticas públicas baseadas em evidência.

Deste modo, o COASTA afirma-se como uma proposta inovadora na interseção entre tecnologia, gestão do risco, ordenamento do território e políticas públicas, com potencial para transformar o HIDRALERTA num instrumento de referência para a gestão integrada de zonas costeiras de risco em Portugal.

Palavras-Chave: Sistema de previsão e alerta; Inundações costeiras; Machine learning; Gestão do risco costeiro; participação informada.



COASTSCAN - PLATAFORMA INTEGRADA PARA VÍDEO MONITORIZAÇÃO COSTEIRA

Diogo OLIVEIRA¹, André CARDOSO¹, Francisco CERDA¹, Bruno ROCHA¹, Paulo BAPTISTA²

1. R5m Marine Solutions (diogooliveira@r5engineers.com)

2. CESAM & Universidade de Aveiro (renato.baganha@ua.pt)

INTRODUÇÃO

A monitorização contínua das zonas costeiras é essencial para compreender a dinâmica litoral e apoiar a gestão costeira. Nos últimos anos, os sistemas de vídeo-monitorização têm assumido um papel relevante, permitindo a aquisição sistemática de dados com elevada resolução temporal. No entanto, a sua utilização continua limitada pela ausência de um modelo base comum, pela variabilidade entre sistemas e por descontinuidades nos processos de aquisição e processamento, o que dificulta a comparação consistente dos dados numa mesma referência espacial e temporal.

Neste contexto, apresenta-se a plataforma COASTSCAN, uma solução digital integrada que centraliza o ciclo de monitorização costeira. A plataforma promove maior consistência e continuidade dos dados, suportando num único ambiente a aquisição, processamento, visualização e análise dos resultados, com foco na utilização operacional e na exploração contínua da informação costeira.

PLATAFORMA DESENVOLVIDA

A plataforma COASTSCAN foi desenvolvida como um sistema integrado para monitorização costeira baseada em vídeo, cobrindo todo o ciclo desde a aquisição de dados até à análise e exploração dos resultados. O sistema assimila dados, em tempo real, provenientes de estações de vídeo monitorização instaladas em torres dedicadas ou outro tipo de infraestruturas, os quais são armazenados na plataforma para processamento.

A consistência espacial dos dados é assegurada através de calibrações extrínsecas com pontos de controlo no terreno, garantindo a correta georreferenciação das imagens. A utilização de presets permite estender de forma consistente estas calibrações e os fluxos de processamento a grandes extensões observadas por uma única câmara, assegurando continuidade espacial ao longo da área monitorizada.

O sistema integra ainda abordagens de validação baseadas em dados independentes, incluindo levantamentos de mosaicos de imagens com veículos aéreos não tripulados (VANT) e medições por Global Navigation Satellite System (GNSS) em campo, permitindo densificar a cobertura espacial de referência e reforçar a robustez das medições derivadas do vídeo.

Com base nesta estrutura, são derivados indicadores costeiros a partir dos dados vídeo, incluindo a deteção automática da linha de esprai das ondas, que constitui a base para a quantificação de vários parâmetros morfodinâmicos.

A principal componente da plataforma COASTSCAN reside na sua interface de visualização e análise, que centraliza a exploração dos produtos gerados e permite uma interpretação integrada da evolução costeira. Esta componente suporta a análise de parâmetros como os ciclos de maré, variações da largura de praia, distância à base da duna, declive da praia, evolução tridimensional da zona intertidal e identificação de tendências temporais, proporcionando um ambiente unificado para exploração e interpretação dos dados.

6. FERRAMENTAS PARA PREVISÃO E MONITORIZAÇÃO COSTEIRA

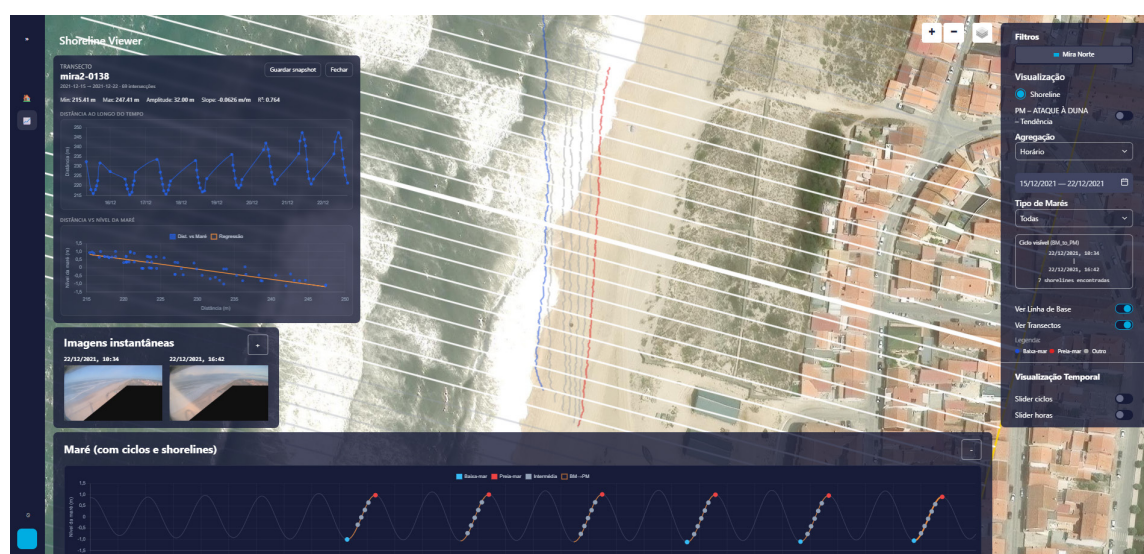
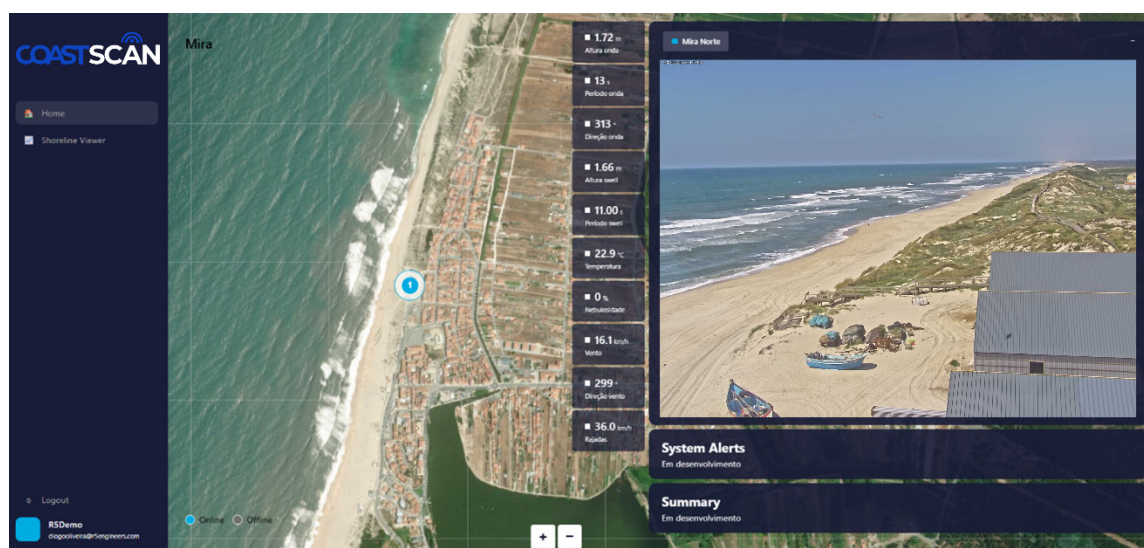


Figura 1: a) Sistema de vídeo monitorização instalado na Praia de Mira; b) COASTSCAN- vídeo e parâmetros de monitorização em tempo real; c) COASTSCAN- visualização e análise de resultados;



CONCLUSÕES

A plataforma COASTSCAN constitui uma solução integrada para monitorização costeira baseada em vídeo, que reduz a fragmentação de dados, e de ferramentas de análise e processamento, reunindo num único ambiente a aquisição, processamento e exploração da informação. Esta integração permite garantir consistência espacial e continuidade temporal dos dados ao longo de extensas áreas monitorizadas por câmaras fixas.

A centralização da análise e visualização de indicadores morfodinâmicos, na interface da plataforma, facilita a interpretação integrada da evolução costeira, fornecendo informação consistente e operacionalmente útil. Neste contexto, a COASTSCAN constitui uma ferramenta de suporte à gestão do litoral, com aplicabilidade em entidades como autoridades ambientais, proteção civil e administrações municipais, contribuindo para a análise e apoio à tomada de decisão em contextos de gestão costeira.

A plataforma encontra-se em evolução no âmbito da sua utilização operacional, incluindo colaboração com entidades responsáveis pela gestão costeira para o desenvolvimento de indicadores adicionais de suporte à decisão.

Palavras-Chave: monitorização costeira; plataforma digital; vídeo-monitorização; linha de costa; análise de dados



PRAIA DA VITÓRIA: DESEMPENHO DO SISTEMA HIDRALERTA

Conceição FORTES¹, Liliana PINHEIRO¹, Catarina ZÓZIMO¹, Larize LIMA^{1,2}, Mauro MACIEL³,
Sofia GOULART³

1. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa (Portugal), jfortes@lnec.pt, lpinheiro@lnec.pt, aczozimo@lnec.pt, llima@lnec.pt

2. Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro (Portugal), larizelima@ua.pt

3. Camaraa Municipal da Praia da Vitória, Av. Álvaro Martins Homem/Marina | 9760-412 Praia da Vitória, mauro.maciell@cmpv.pt, sofia.goulart@cmpv.pt

RESUMO

O Projeto LIFE-GARACHICO (LIFE20 CCA/ES/001641) tem como objetivo desenvolver um quadro estratégico de adaptação flexível às inundações costeiras, reconhecendo as alterações climáticas como um fator de agravamento do risco em áreas urbanas da Macaronésia (Canárias e Açores). No caso da Praia da Vitória (Ilha Terceira, Açores), esta abordagem combina a utilização do sistema de previsão e alerta de galgamentos e inundações costeiras HIDRALERTA com metodologias participativas que envolvem o município e a comunidade local na identificação de vulnerabilidades e na definição de soluções destinadas a reforçar a resiliência costeira. Desta forma, o projeto LIFE-GARACHICO (Lima *et al.* 2025) afirma-se como um modelo de gestão costeira integrada e adaptativa, ajustável a diferentes contextos locais e replicável em outros territórios sujeitos a riscos semelhantes.

O HIDRALERTA (Fortes *et al.*, 2013; Poseiro, 2019), desenvolvido e operado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, é um sistema de previsão e alerta de galgamentos e inundações costeiras concebido para apoiar a gestão do risco em zonas costeiras e portuárias com base em medições e previsões de agitação marítima. O sistema utiliza, como informação de base, previsões e medições de agitação marítima e integra: (i) modelos numéricos para a propagação da agitação marítima desde o largo até à zona costeira e portuária; (ii) ferramentas baseadas em redes neuronais para estimativa do caudal médio de galgamento; (iii) metodologias de avaliação do risco para definição de níveis de alerta; (iv) sistemas de disseminação de informação para apoio à tomada de decisão e à gestão de emergência.

Desde 2022, o HIDRALERTA tem sido utilizado pela Portos dos Açores, S.A. para mitigar os impactos de eventos severos de galgamento na zona portuária da Praia da Vitória. No âmbito do LIFE-GARACHICO, a sua aplicação foi alargada à autarquia e ao Serviço Municipal de Proteção Civil, passando a abranger também as zonas costeiras urbanas adjacentes. Sempre que é emitido um alerta de galgamento, os serviços municipais comunicam ao LNEC a ocorrência (ou não) do fenómeno, a sua magnitude e extensão, bem como a necessidade de adoção de medidas preventivas, como o encerramento de vias pedonais e/ou rodoviárias.

A análise dos registos efetuados desde 2022 mostrou que cerca de 25% dos alertas emitidos pelo sistema não corresponderam a situações confirmadas pelas autoridades locais. Com o objetivo de compreender as razões destas discrepâncias, foi analisada toda a série temporal disponível, identificando-se as condições de agitação marítima em que o HIDRALERTA não reproduziu adequadamente a realidade observada, procurando-se estabelecer padrões associados a esses casos.

Para essas situações, foram realizadas simulações complementares com o modelo numérico SWASH (Zilema *et al.*, 2011), permitindo calcular com maior detalhe o galgamento e a extensão da inundação. Em seguida, aplicou-se uma metodologia de avaliação multicritério baseada no



método Analytic Hierarchy Process para estimar o risco associado. Os resultados demonstram que esta abordagem fornece previsões mais precisas, embora exija maior tempo de processamento, o que limita a sua utilização em tempo real num sistema operacional de alerta.

Adicionalmente, toda a série de alertas emitidos desde 2022 foi recalculada com base na nova metodologia, permitindo avaliar os ganhos de desempenho obtidos.

Na presente comunicação descreve-se a metodologia adotada e apresentam-se os principais resultados, evidenciando o contributo desta abordagem para o aperfeiçoamento dos sistemas de alerta de galgamentos e para o reforço da resiliência costeira na Praia da Vitória.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é financiado pelo Programa LIFE da União Europeia (55%), através do Projeto LIFE-GARACHICO — Adaptação das inundações costeiras às alterações climáticas através de estratégias flexíveis em áreas urbanas da Macaronésia (LIFE20 CCA/ES/001641, 2021–2026).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Fortes, C.; Reis, M.T.; Poseiro, P. (2013) O projeto HIDRALERTA: Sistema de previsão e alerta de galgamentos em zonas costeiras e portuárias. In Proceedings of the 8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN/PIANC, Lisboa, Portugal, 10–11 October 2013; LNEC: Lisbon, Portugal.

Lima, L., Fortes, C. J. E. M., Zózimo, A. C. & Pinheiro, L. V. (2025). “The LIFE-GARACHICO Project: A Holistic and Flexible Management of Coastal Flooding Risk in Praia da Vitória, Azores”. *GeoHazards*, 6(2), 25 pp.

Poseiro, P.G.G. (2019). “Forecast and Early Warning System for Wave Overtopping and Flooding in Coastal and Port Areas: Development of a Model and Risk Assessment”. Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 495 pp.

Zijlema, M., Stelling, G.S., Smit, P. (2011). “SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters”. *Coastal Engineering*, 58(10), pp. 992–1012.

Palavras-Chave: LIFE-GARACHICO; Praia da Vitória; HIDRALERTA, Galgamento



ATLANTICSENSE: UMA PLATAFORMA METEOCEANOGRÁFICA OPERACIONAL PARA PREVISÃO DE PERIGOS COSTEIROS EM PORTUGAL

Nícolas de Assis BOSE¹, Soraia ROMÃO¹, Luíz Pedro ALMEIDA², Catarina CECÍLIO¹, Andreia SILVA¹, Francisco CAMPUZANO¹, Caio FONTELES¹

1. +ATLANTIC CoLAB, IPL-ESTM, Rua do Conhecimento 4 2520-614 Peniche, Portugal nicolas.bose@colabatlantic.com, soraia.romao@colabatlantic.com, catarina.cecilio@colabatlantic.com, andreia.silva@colabatlantic.com, francisco.campuzano@colabatlantic.com e caio.fonteles@colabatlantic.com

2. Instituto Dom Luiz (IDL) – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal lpealmeida@fc.ul.pt

RESUMO

Eventos extremos do nível do mar representam riscos crescentes para as comunidades costeiras, particularmente ao longo da costa continental portuguesa, fortemente exposta à variabilidade meteoceanográfica do Atlântico Norte. Este trabalho apresenta um modelo operacional empírico para previsão de impactos de tempestades costeiras, baseado na integração de condições de onda, nível do mar e morfologia costeira. A abordagem permite fornecer previsões rápidas de risco à escala nacional, com foco em processos como inundação costeira e galgamento. Implementado como componente de um sistema de alerta para perigos costeiros, o modelo fornece uma estimativa operacional de primeira ordem dos impactos potenciais de tempestades, apoiando a tomada de decisão em contextos que exigem resposta rápida e informação localizada.

Palavras-Chave: Monitorização costeira; Sistema de alerta; Modelação numérica.

1. INTRODUÇÃO

As zonas costeiras encontram-se sob elevada vulnerabilidade climática e antrópica, sendo pressionadas tanto pelo desenvolvimento das comunidades costeiras quanto pelos efeitos das alterações climáticas. Em Portugal, estudos têm indicado que um número crescente de municípios costeiros está exposto a eventos extremos associados à elevação do nível médio do mar, às condições meteorológicas, à dinâmica das marés e às condições de agitação marítima. A interação entre estes processos, incluindo *wave setup*, *wave run-up* e características da morfologia costeira, pode produzir perigos compostos, tais como inundação costeira, galgamento, erosão e danos em infraestruturas. Estes impactos tendem a agravar-se em cenários futuros de alterações climáticas, tornando a gestão do risco costeiro um desafio cada vez mais complexo para as comunidades costeiras e para os decisores locais. Na região de Lisboa, por exemplo, Antunes *et al.* (2019) indicam que cerca de 90% da área analisada apresenta elevado potencial de risco até 2050. Neste contexto, Portugal, com a sua extensa e exposta linha de costa atlântica, representa uma área particularmente sensível aos impactos de tempestades costeiras, os quais já causam danos socioeconómicos e ambientais recorrentes. Em muitos casos, a informação de alerta permanece demasiado técnica, pouco localizada ou desalinhada com as necessidades operacionais dos utilizadores finais. Assim, este trabalho centra-se no desenvolvimento e na implementação operacional de um modelo empírico de impacto de tempestades para Portugal continental, bem como no seu papel como primeira camada preditiva de um sistema costeiro de alerta precoce.

2. METODOLOGIA

O modelo empírico de impacto de tempestades para Portugal continental integra previsões operacionais do +ATLANTIC, incluindo o modelo regional de circulação MOHID/PCOMS (Campuzano, 2018) e o modelo de ondas WAVEWATCH III. A metodologia adota uma abordagem de complexidade reduzida para estimar, à escala horária, o nível total da água (*Total Water Level*, TWL), o *wave run-up*, o galgamento e a escala de impacto costeiro ao longo de praias arenosas, para um horizonte operacional de até seis dias. As seções transversais à linha de costa são definidas com base em dados do Programa COSMO/APA, levantamentos topobatimétricos LiDAR2011/DGT e observações in situ, permitindo caracterizar o declive costeiro e os limiares morfológicos relevantes. As condições de onda ao largo são fornecidas pelo WAVEWATCH III, enquanto a maré astronómica e a sobre-elevação meteorológica são obtidas a partir do MOHID/PCOMS nas profundidades de fecho de cada perfil. O *wave run-up* é estimado pela formulação de Stockdon, e a escala de impacto é avaliada com base na abordagem de Sallenger, permitindo identificar condições potenciais de inundação, galgamento e indicadores de erosão costeira. (Stockdon *et al.*, 2023; Turner *et al.*, 2024)

O nível de impacto da inundação costeira e do impacto das ondas é classificada por meio do Flooding Hazard Index, composto por quatro níveis: *Index1 - Sem impacto*, associado a condições calmas de agitação marítima, sem inundação ou erosão visível; *Index2 - Impacto moderado*, quando as ondas podem atingir a base da duna ou de estruturas costeiras, com possível redução da largura da praia e ocorrência localizada de erosão; *Index3 - Impacto elevado*, quando as ondas atingem diretamente estruturas costeiras e podem causar galgamento, erosão e inundação local ocasional; e *Index4 - Impacto severo*, quando ocorre inundação contínua atrás de dunas ou defesas costeiras, ou quando há ruptura da crista dunar, permitindo inundação para o interior. Esta classificação permite traduzir os níveis de água previstos em categorias operacionais de perigo, tornando a informação mais acessível para apoio à decisão à escala local.

3. VALIDAÇÃO, VISUALIZAÇÃO E OPERAÇÃO DO SISTEMA

O modelo empírico encontra-se operacional e integrado na plataforma geoespacial AtlanticSense (<https://www.atlanticsense.com/>), onde as previsões são atualizadas diariamente para a costa continental portuguesa. O sistema fornece previsões de curto prazo e informação operacional sobre perigo costeiro, permitindo acompanhar condições favoráveis à ocorrência de inundação, galgamento e indicadores de erosão durante eventos de tempestade. A avaliação do desempenho do modelo é apoiada por comparações contínuas com sistemas de monitorização costeira, incluindo imagens da MEO Beachcam e registos documentados do impacto de tempestades reportados através da comunicação social e plataformas digitais. Estas fontes permitem verificar qualitativamente a capacidade do modelo em prever a ocorrência de eventos, contribuindo para a sua aplicação em condições operacionais.

A Figura 1 apresenta a previsão operacional para Cruz Quebrada durante a tempestade Leonardo, em fevereiro de 2026, bem como os danos observados na marginal costeira após o evento. O modelo indicou índice 3 no *Flooding Hazard Index*, associado a impacto severo, com condições favoráveis à ocorrência de galgamento. Esta comparação fornece uma avaliação qualitativa da capacidade do sistema em representar impactos observados em contexto operacional.

CONCLUSÃO

A implementação operacional ao longo da costa continental portuguesa demonstra que o modelo empírico constitui uma abordagem eficiente para prever, numa primeira aproximação, os perigos associados a tempestades costeiras. Ao fornecer informação localizada e atualizada em contexto operacional, o sistema apoia a tomada de decisão face à previsão de condições meteoceanográficas

adversas e contribui para a estruturação de sistemas de alerta precoce escaláveis para a gestão do risco costeiro.

AGRADECIMENTOS

Trabalho desenvolvido no âmbito dos projetos CoastSafe (<https://doi.org/10.54499/2024.15470>. PEX), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), e FOCCUS (<https://doi.org/10.3030/101133911>, *Grant Agreement* No. 101133911), financiado pelo programa Horizonte Europa da União Europeia.

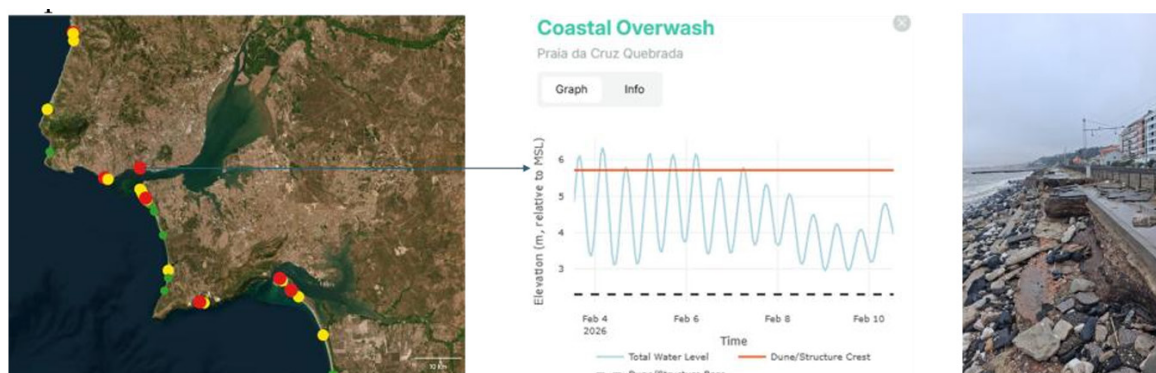


Figura 1. Previsão operacional do evento de elevação do nível do mar na costa de Cruz Quebrada, Portugal, indicando condições favoráveis à ocorrência de galgamento costeiro. A imagem apresenta também os danos observados na marginal após a passagem da tempestade Leonardo.

REFERÊNCIA

- Antunes, C., Rocha, C., & Catita, C. (2019). Coastal flood assessment due to sea level rise and extreme storm events: A case study of the atlantic coast of Portugal's mainland. *Geosciences*, 9(5), 239.
- Campuzano, F., 2018. 'Coupling watersheds, estuaries and regional seas through numerical modelling for Western Iberia', [PhD Thesis]. Universidade de Lisboa.
- Stockdon, H. F., Long, J. W., Palmsten, M. L., Van der Westhuysen, A., Doran, K. S., & Snell, R. J., 2023. 'Operational forecasts of wave-driven water levels and coastal hazards for US Gulf and Atlantic coasts', *Communications Earth & Environment*, 4(1), 169. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00817-2>
- Turner, I. L., Leaman, C. K., Harley, M. D., Thran, M. C., David, D. R., Splinter, K. D., Matheen, N., Hansen, J. E., Cuttler, M. V. W., Greenslade, D. J. M., Zieger, S., & Lowe, R. J., 2024. 'A framework for national-scale coastal storm hazards early warn



DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS DE MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA E MORFODINÂMICA PARA APOIO À PREVISÃO E ALERTA NO ESTUÁRIO DO RIO CÁVADO E ZONA COSTEIRA ADJACENTE

Miguel PEREIRA¹, José PINHO¹

1. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil / Centro do Território, Ambiente e Construção - CTAC, Guimarães, Portugal,
email: pg55761@alunos.uminho.pt, jpinho@civil.uminho.pt

INTRODUÇÃO

Os estuários e as zonas costeiras adjacentes constituem sistemas de elevada complexidade hidrodinâmica e morfodinâmica, sujeitos à interação entre maré, caudal fluvial, agitação marítima, transporte sedimentar e evolução da embocadura. No contexto das alterações climáticas, estes sistemas enfrentam pressões acrescidas associadas à subida do nível médio do mar, à intensificação de eventos extremos, à erosão costeira e ao aumento da exposição de infraestruturas, ecossistemas e atividades socioeconómicas (IPCC, 2021).

O estuário do rio Cávado e a zona costeira adjacente, em Esposende, constituem um caso de estudo particularmente relevante. A embocadura apresenta elevada variabilidade morfológica, condicionando a circulação estuarina, a propagação da maré, a inundação marginal, o transporte sedimentar e a resposta da praia e do sistema dunar envolvente. Esta variabilidade dificulta a avaliação de risco e exige ferramentas capazes de integrar dados topobatimétricos, informação costeira e modelação numérica.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de ferramentas de modelação do sistema estuarino e costeiro do rio Cávado, numa perspetiva de apoio futuro à previsão hidrodinâmica e à emissão de alertas. A abordagem insere-se no âmbito do projeto MarUMinho e de uma dissertação de mestrado em Engenharia Civil, procurando estabelecer uma base numérica robusta, suportada por trabalhos desenvolvidos anteriormente, para simular a dinâmica do estuário e da zona costeira adjacente, avaliar cenários de forçamento marítimo e fluvial e apoiar a análise preliminar de medidas de adaptação costeira (Gomes, 2017; Mendes, 2018).

MÉTODOS

O trabalho em curso centra-se na construção e atualização de modelos numéricos representativos do estuário do rio Cávado, da embocadura e da zona costeira adjacente. A primeira etapa consiste na organização, análise e integração de informação topográfica e batimétrica proveniente de diferentes fontes, incluindo batimetria derivada de imagens de satélite, levantamentos do programa COSMO realizados em 2025, dados LiDAR de 2011 e outra informação geográfica e morfológica disponível para a área de estudo.

Esta integração de dados permite construir uma representação razoável do domínio de cálculo, essencial para a definição das malhas computacionais e para a caracterização da morfologia da embocadura, dos bancos arenosos, dos canais principais, da praia adjacente e das zonas marginais potencialmente inundáveis. A informação topobatimétrica foi harmonizada em termos de sistema de referência, resolução espacial e coerência altimétrica, procurando reduzir discontinuidades entre fontes de dados e garantir uma base física adequada à modelação.

A segunda componente corresponde à preparação das malhas numéricas e das condições de fronteira necessárias à simulação da circulação estuarina e costeira. São considerados forçamentos marítimos, incluindo maré e agitação, e forçamentos fluviais associados ao caudal do rio Cávado. A articulação entre o domínio estuarino e o domínio costeiro foi tratada de modo a representar a influência recíproca entre a embocadura, a propagação da maré, a agitação incidente e os processos de transporte sedimentar.

A terceira componente envolve a calibração e aplicação de modelos hidrodinâmicos e, quando aplicável, morfodinâmicos, com base em trabalhos anteriores e em dados de campo disponíveis. Pretende-se analisar padrões de circulação, zonas preferenciais de escoamento, variações espaciais de nível de água, resposta da embocadura a diferentes condições de forçamento e sensibilidade do sistema a alterações morfológicas. Esta abordagem permitirá identificar os elementos mais críticos para uma futura cadeia operacional de previsão (Mendes, 2018).

Neste trabalho, prevê-se apresentar a estrutura das ferramentas de modelação desenvolvidas, as malhas computacionais, a batimetria integrada e os primeiros resultados de simulações de referência. A Figura 1 sintetiza estes elementos, incluindo o domínio de cálculo, a malha numérica, as principais fontes topobatimétricas utilizadas e a representação da embocadura e zona costeira adjacente.

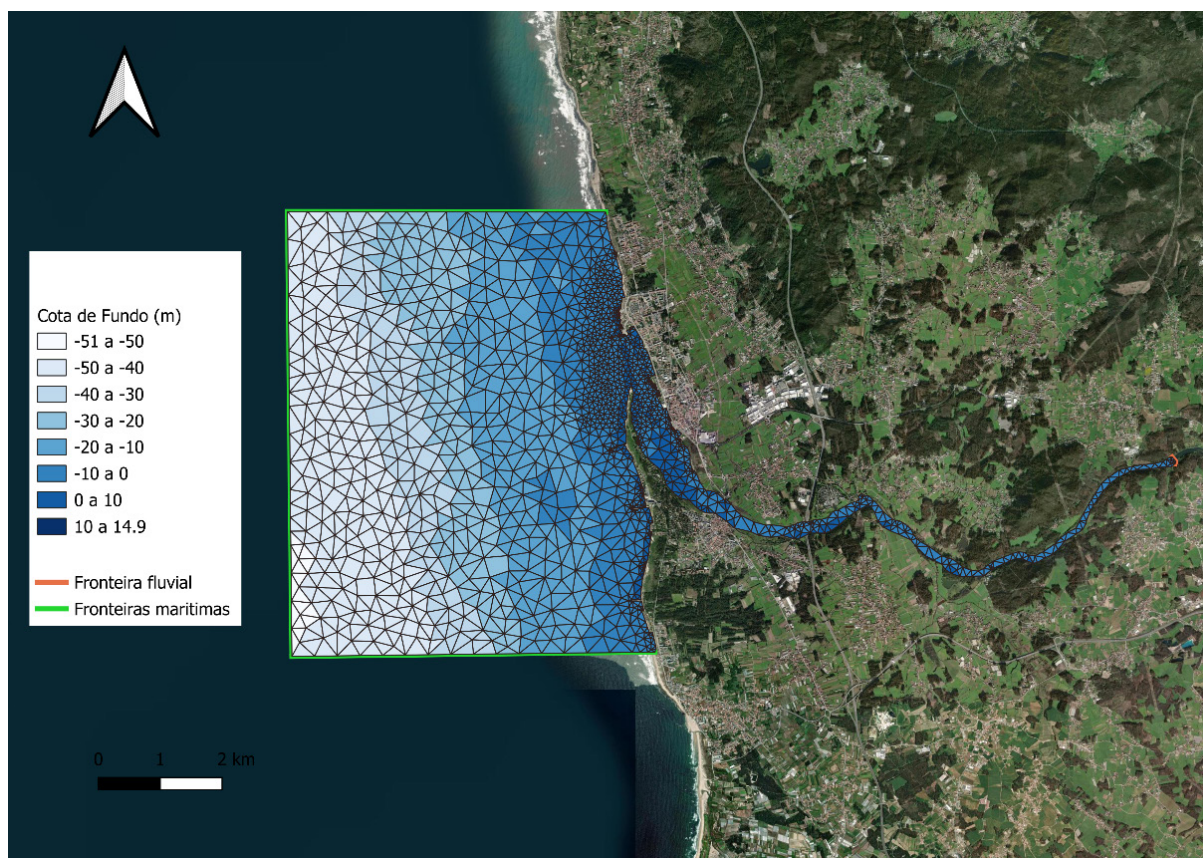


Figura 1 – Domínio de modelação do estuário do rio Cávado e da zona costeira adjacente, com representação da malha computacional, da distribuição da cota batimétrica e das fronteiras marítimas e fluvial.

Será apresentada uma versão consolidada das ferramentas de modelação, incluindo a base topobatimétrica integrada, as malhas de cálculo, os principais cenários de forçamento e os primeiros resultados de simulações hidrodinâmicas para o sistema estuarino e costeiro do rio Cávado.

Será considerada a resposta do estuário a diferentes combinações de maré, caudal fluvial e condições marítimas, identificando zonas de maior sensibilidade hidrodinâmica, áreas potencialmente sujeitas a inundação e setores onde a morfologia da embocadura condiciona de forma mais significativa



a propagação dos níveis de água e a circulação. Esta análise será particularmente relevante para compreender a ligação entre a configuração morfológica da embocadura e a exposição da frente urbana, das margens estuarinas, da praia e do sistema dunar adjacente.

Para além da construção/atualização, calibração e validação dos modelos, do ponto de vista operacional, o trabalho contribuirá para identificar requisitos necessários à implementação de um sistema de previsão e emissão de alertas para o estuário e zona costeira adjacente que se encontra em fase de desenvolvimento. Entre estes requisitos incluem-se a disponibilidade de dados para definição das fronteiras marítima e fluvial, a atualização periódica da morfologia, a recalibração dos modelos, a definição de indicadores de risco e a ligação entre resultados numéricos e produtos de apoio à decisão.

Será ainda discutida a utilidade destas ferramentas para a avaliação preliminar de cenários de adaptação costeira, incluindo cenários associados à subida do nível médio do mar, eventos de agitação marítima intensa e soluções de proteção ou adaptação inspiradas em processos naturais. Embora a avaliação detalhada de Soluções Baseadas na Natureza constitua uma etapa posterior, a construção de uma base de modelação robusta é condição essencial para comparar cenários, testar alternativas e apoiar decisões de gestão territorial.

O desenvolvimento de ferramentas de modelação para o estuário do rio Cávado e zona costeira adjacente constitui um passo fundamental para transformar informação dispersa, batimetria, topografia, levantamentos costeiros, dados hidrodinâmicos e condições de fronteira, em conhecimento operacional. Esta abordagem permite aproximar a investigação académica das necessidades de gestão costeira, criando as bases para sistemas de previsão e emissão de alertas capazes de apoiar a adaptação de territórios estuarinos e costeiros aos impactos das alterações climáticas.

Palavras-Chave: estuário do Cávado; Esposende; modelação hidrodinâmica; modelação morfodinâmica; batimetria; previsão costeira; sistemas de alerta; adaptação costeira.

REFERÊNCIAS

Gomes, A. C. M. (2017). *Contributos para a caracterização da morfodinâmica de praias sob influência de estruturas antrópicas*. <https://hdl.handle.net/1822/70548>

Mendes, J. G. B. S. F. (2018). (2018). *Morfodinâmica da praia de Ofir em diferentes estados de agitação marítima*. <https://hdl.handle.net/1822/71088>

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis | Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>



UTILIZAÇÃO DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA REMOTA NA SELEÇÃO DAS ÁREAS MAIS ADEQUADAS PARA A PRODUÇÃO DE MACROALGAS NA COSTA PORTUGUESA: *SACCHARINA LATISSIMA*

Luís RESENDE^{1,2,3}, João M. NETO^{1,2,3}, Zara TEIXEIRA^{2,3,4}, Ana GARCIA^{2,3,5}, Margarida H. MATIAS²

1. Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, luis.resende@uc.pt, jneto@ci.uc.pt

2. MARE Centro de Ciências do Mar e do Ambiente, margarida.h.matias@outlook.pt

3. ARNET Rede de Investigação Aquática,

4. Universidade de Évora, Évora, Portugal, zara.teixeira@uevora.pt

5. Ecletikpigment Unipessoal Lda, Malavado, S/N, Apartado 3756 7630-584 São Teotónio, epigment@outlook.pt

INTRODUÇÃO

Para competirem globalmente no mercado da produção de macroalgas, os investidores devem possuir uma compreensão abrangente das limitações e das oportunidades associadas ao setor. Quando o objetivo é a produção de macroalgas através de sistemas de aquacultura, as condições ambientais, nomeadamente: a disponibilidade de luz, o intervalo de temperatura e as propriedades físico-químicas da água, constituem os principais fatores que regulam o crescimento macroalgal. Uma vez que o cultivo de macroalgas é tipicamente realizado em ambientes offshore, a fertilização direta revela-se, em geral, ineficiente. Consequentemente, a profundidade de cultivo deve ser cuidadosamente otimizada, de modo a evitar limitações de crescimento associadas tanto à exposição excessiva como insuficiente à luz. Adicionalmente, a variabilidade espacial e temporal da temperatura da água deve ser devidamente caracterizada, permitindo a seleção adequada dos locais de cultivo de acordo com os requisitos ecológicos das espécies-alvo. *Saccharina latissima* é uma macroalga castanha promissora para cultivo offshore no Atlântico Norte, sendo identificada como espécie prioritária nas estratégias da bioeconomia azul da União Europeia. Esta espécie apresenta elevada robustez ecológica, adaptabilidade às condições do oceano aberto, uma considerável flexibilidade de habitat e grande valor para a indústria alimentar e biotecnológica, características que a tornam adequada para cultivo em larga escala.

Com o objetivo de identificar os locais mais apropriados para a produção eficiente desta espécie, o presente estudo avalia as condições de temperatura, luz e nutrientes ao longo da costa portuguesa, recorrendo a dados do Copernicus referentes ao período entre 1993 e 2023. Estes dados são integrados num índice normalizado de aptidão para o cultivo, variando entre 0 e 1, permitindo a classificação espacial das áreas costeiras de acordo com o seu potencial produtivo. Os resultados permitirão identificar regiões com maiores índices de aptidão, destacando assim áreas prioritárias para o cultivo de *Saccharina latissima*.

MATERIAL E MÉTODOS

O conjunto de dados incluiu o coeficiente de atenuação volumétrica do fluxo radiativo descendente na água do mar (K_d), a concentração molar de amónia, nitrato e fosfato na água do mar (NH_4^+ , NO_3^- e PO_4^{3-}), a temperatura potencial da água do mar ($^{\circ}\text{C}$) e a radiação fotossinteticamente ativa total à superfície (PAR) ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Os dados foram obtidos a partir do: Copernicus — Atlantic-Iberian Biscay Irish Ocean BioGeoChemistry Non-Assimilative Hindcast e Ocean Physics Reanalysis datasets, bem como do dataset da NASA/POWER CERES Synoptic Radiative Fluxes and Clouds. A resolução temporal foi diária para todos os conjuntos de dados do Copernicus e mensal para os dados da NASA. A resolução espacial variou consoante a fonte, tendo sido posteriormente

harmonizada para uma grelha de $0,028^\circ \times 0,028^\circ$, no sistema de coordenadas geográficas WGS 1984, com processamento realizado no ArcGIS Pro™.

A literatura indica que *Saccharina latissima* apresenta crescimento ótimo com um integral diário de luz (DLI) entre $6\text{--}10 \text{ mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, temperaturas entre $10\text{--}15^\circ \text{C}$ e concentrações de N de aproximadamente 8 mmol m^{-3} . Com base na Razão de Redfield (16:1), assumiu-se uma concentração ótima de P de $0,5 \text{ mmol m}^{-3}$. Os dados foram convertidos para unidades de referência e normalizados através de um índice de pontuação entre 0 e 1, no qual valores próximos de 1 indicam condições ótimas e valores próximos de 0 refletem desempenho inferior relativamente ao ótimo.

Cada variável foi transformada de acordo com as condições ótimas de crescimento da espécie. A temperatura e o DLI foram modelados assumindo uma resposta do tipo gaussiana, com valores ótimos de 13°C e $6 \text{ mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, respetivamente. A inclinação das curvas foi ajustada de modo a representar a adaptação natural da macroalga às condições ambientais. Para a condição da razão N:P, a equação determinou inicialmente o elemento limitante, sendo posteriormente atribuídas pontuações de forma linear até aos limiares de saturação ($N = 8 \text{ } \mu\text{mol m}^{-3}$ e $P = 0,5 \text{ } \mu\text{mol m}^{-3}$). Para valores superiores aos máximos definidos, foi considerado que a macroalga ultrapassou o ponto de saturação, sendo-lhes atribuída uma pontuação de 1. Os valores de PAR foram convertidos em integral diário de luz (DLI) e depois aplicado o coeficiente de atenuação luminosa (K_d) para estimar os valores de DLI às profundidades de 10, 15 e 20 m. Os valores indicaram que as pontuações de aptidão a 20 m de profundidade foram consistentemente superiores levando à seleção desta profundidade como referência padrão para a restante análise.

RESULTADOS PRELIMINARES

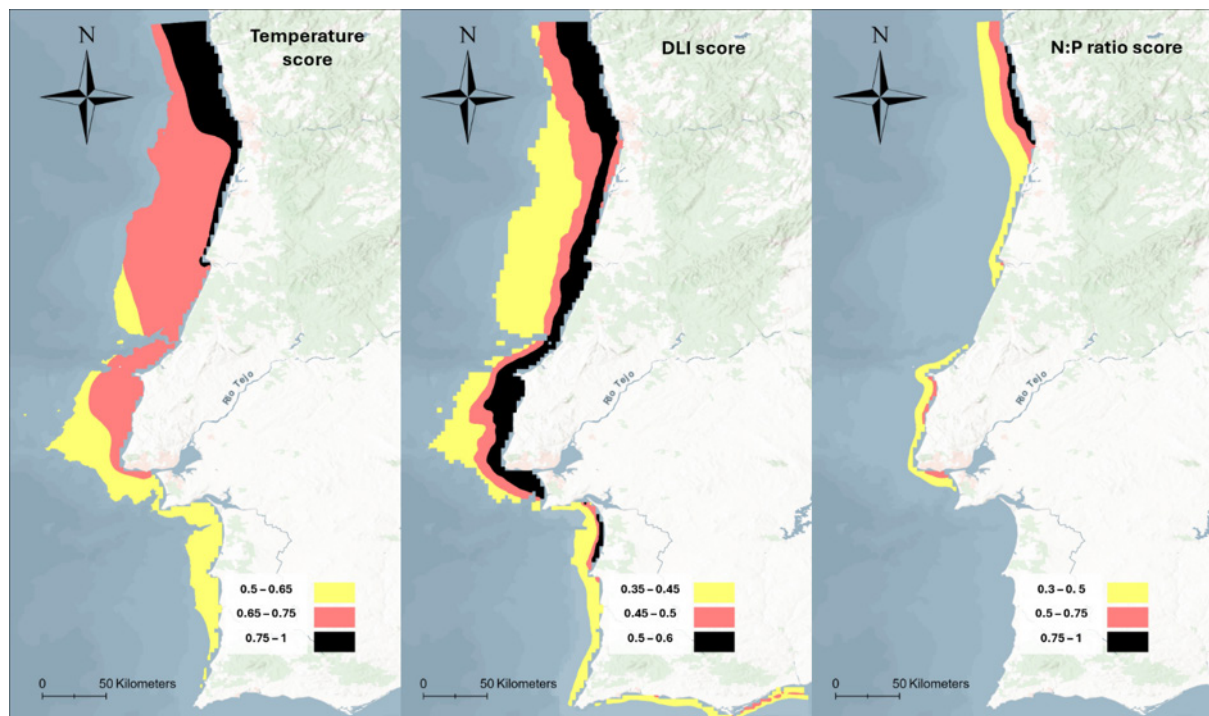


Figure 1 – Valores de pontuação para a temperatura (temperature score), integral diário de luz (DLI score) e disponibilidade de nutrientes (ratio N:P score), em relação às condições ótimas de crescimento da *Saccharina latissima*. As zonas representadas a preto são consideradas as mais adequadas, seguidas pelas zonas a vermelho e, posteriormente, pelas zonas a amarelo. A figura apresenta os valores agregados para o período selecionado (1993–2023), considerando apenas os meses correspondentes ao período de cultivo de *Saccharina latissima*, entre outubro e o final de maio.



Tendo em consideração a preferência de *Saccharina latissima* por águas mais frias, as localizações mais adequadas, do ponto de vista térmico, concentram-se no setor mais setentrional da área de estudo, em concordância com a distribuição natural conhecida desta espécie ao longo da costa portuguesa. As condições de temperatura mantêm-se favoráveis até aproximadamente ao estuário do Tejo, sendo geralmente observados valores de aptidão mais elevados ($>0,65$) em zonas costeiras próximas da linha de costa. O índice de integral diário de luz (DLI) apresenta um padrão espacial semelhante ao da temperatura, embora com valores inferiores. Existe espaço para otimizar a profundidade de cultivo selecionada (20 m) de forma a obter melhores resultados. No entanto os valores de DLI variam em resposta às alterações sazonais do fotoperíodo e turbidez da água, o que implica a necessidade de uma estratégia operacional equilibrada que evite ajustes frequentes e desnecessários da profundidade durante o ciclo de cultivo. A disponibilidade de nutrientes, representada pelo índice da razão N:P, desempenha um papel determinante na definição das áreas mais adequadas para o cultivo sendo o fator mais limitante nesta avaliação, dadas as necessidades da *Saccharina latissima*.

Considerando as 3 variáveis de temperatura, disponibilidade de luz e nutrientes identificam-se duas regiões de maior interesse: uma entre Caminha e a Figueira da Foz e outra entre a Nazaré e o estuário do Tejo. Fora destas áreas, é provável a ocorrência de limitações nutricionais ao longo do ciclo de cultivo, pelo que a seleção de locais deverá privilegiar zonas onde as condições de temperatura e luz sejam ótimas, compensando a menor disponibilidade de nutrientes. Neste contexto, toda a faixa costeira entre Caminha e Sines poderá proporcionar condições térmicas e de luminosidade adequadas para a produção de *Saccharina latissima*, embora com um risco moderado de redução do crescimento.

Financiado por: FCT bolsa doutoramento <https://doi.org/10.54499/2023.04308.BDANA>.

Palavras-Chave: Aquacultura; Macroalgas; *Saccharina latissima*; Condições oceânicas; Offshore.



XII CPGZC

ESTRUTURAS COSTEIRAS E OFFSHORE



DAMAGE EVOLUTION IN THE HEAD SECTION OF A BREAKWATER

Rute LEMOS¹, Ana MENDONÇA^{1,2}, Conceição J.E.M. FORTES¹, Carolina MARTINEZ¹, Tiago LOPES², Lucas BRITO³, Bruno PEREIRA², Helder Girão²

1. Laboratório Nacional de Engenharia de Lisboa, Av. do Brasil, 101, Lisboa, rlemos@lnec.pt; amendonca@lnec.pt; jfortes@lnec.pt; cmartinez@lnec.pt; 20230245@alunos.iseclisboa.pt; A49820@alunos.isel.pt; 20210316@alunos.iseclisboa.pt; heldersilvagirao@gmail.com

2. Instituto Superior de Educação e Ciências (ISEC-Lisboa), Alameda das Linhas de Torres 179, Lisboa

3. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL-Lisboa), Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1, Lisboa

INTRODUCTION

The head section of rubble-mound breakwaters continues to be one of the most fragile areas in terms of armor layer stability and is therefore the subject of very careful study when validating its hydraulic stability in physical models. Depending on the depth at which the breakwater is founded, damage and potential failure may begin at the toe, if the structure is built in shallow water, or along the slope, if waves are not depth-limited and breaking occurs on the slope.

The stability of the armor layer at the breakwater head has been studied by several authors, both for structures composed of rock armor (Vidal *et al.*, 1991, 1995; Van Gent *et al.*, 2010; Hofland *et al.*, 2014) and for artificial units (Jensen, 1984; Sande *et al.*, 2018).

Within the scope of the ProCoast-3D project, a three-dimensional physical model study of the Ericeira harbor breakwater was carried out in one of the irregular wave basins at LNEC – Portugal (Figure 1). The objective of the study was to assess the evolution of damage at the head (and trunk) of the breakwater under sea states corresponding to storm conditions of varying intensity and duration. This made it possible to evaluate the behavior of the breakwater (especially the head section) with variations in significant wave height, peak period, and wave steepness.

The armor layer of the breakwater sections is composed of:

- Trunk: 300 kN tetrapods, with a nominal diameter of 0.034 m (model value) and porosity of 0.45;
- Head: 550 kN Antifer cubes, with a nominal diameter of 0.042 m (model value) and porosity of 0.30.

The model was built and operated at a 1:65 scale, in accordance with Froude similarity law.

METHODOLOGY AND RESULTS

The tests were conducted according to three distinct sequences: the first two (Sequence A and Sequence B) were performed with a progressive increase in tidal levels, peak periods, and significant wave heights. The difference between Sequence A and Sequence B was their duration. In Sequence A, sea states were repeated until damage stabilization before moving to the next sea state. This sequence resulted in 56 tests. Sequence B had a predefined duration of 15 tests. Sequence C also included 15 tests conducted with increasing significant wave heights, but this time with decreasing tidal levels and peak periods.

Damage was assessed using photographs taken before and after each test and through 3D surveys using a Kinect position sensor, allowing the determination of eroded volume and area. Figure 2a) shows the point clouds obtained at the beginning and at the end of test series B. Figure 2b) shows the map of elevation differences between the initial and final surveys, enabling the determination of eroded volume using the open-source software CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2006).

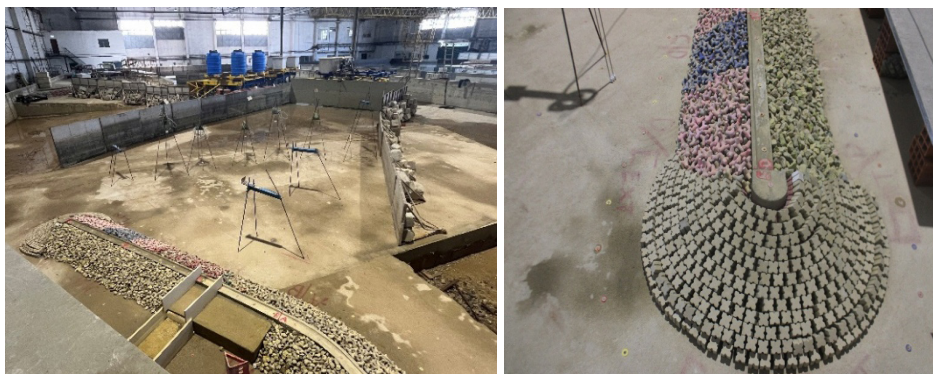


Figure 1. Physical model of the Ericeira breakwater. Detail of the head section

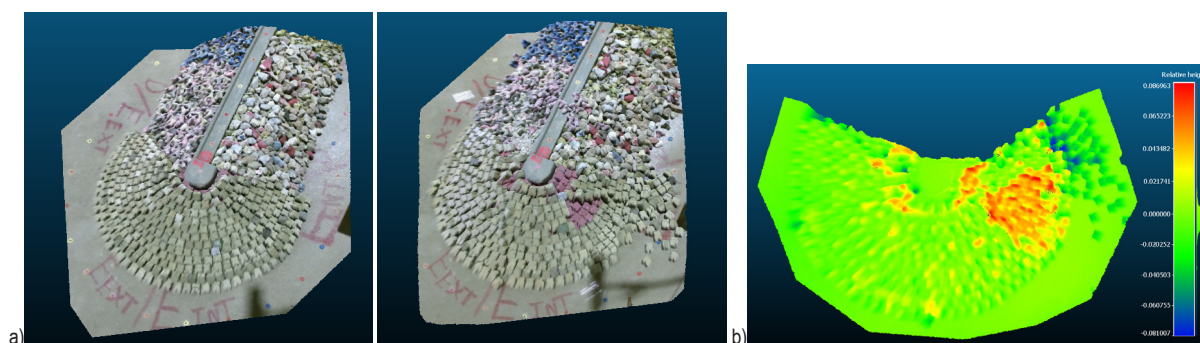


Figure 2. a) Point clouds at the beginning and at the end of test series B. b) Map of differences between point elevations (red: erosion; blue: deposition)

For all tests, the non-dimensional damage parameter (S) was calculated based on the eroded volume of the most affected region. A dimensionless damage parameter (S) can be defined as:

$$S = \frac{V_{erod} \cdot (1-P)}{V_u}$$
 where: V_{erod} is the eroded volume of the studied area, V_u is the volume of the Antifer cube and P is the porosity. It roughly represents the number of units removed from the armour layer at the most damaged area.

At the end of test series A, B and C, the damage parameter (S) was 87, 73 and 54, respectively.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the ProCoast 3D project (CPISEC/PID/001/2023-24), funded by the Instituto Superior de Educação e Ciência (ISEC-Lisboa), and the COASTLIFE project (LISBOA2030 FEDER 00918000/14681), funded by FCT and WISER project, developed within the scope of the Risk and Safety in Ports and Maritime Structures Program of the Research and Innovation Strategy (E2I) 2021-2027 of LNEC.

REFERENCES

- Girardeau-Montaut, D. (2006). Détection de changement sur des données géométriques tridimensionnelles. PhD Thesis. Télécom ParisTech.
- Hofland, B., Disco, M. A. R. K., & Van Gent, M. R. A. (2014). Damage characterization of rubble mound roundheads. Proc. CoastLab2014. Varna, Bulgaria.
- Jensen, O.J. (1984). A monograph on rubble mound breakwaters, DHI, Hørsholm.



Sande, J., Peña, E., & Maciñeira, E. (2018). Stability of breakwater roundhead protected with a Cubipod single-layer armor. *Applied Ocean Research*, 79, 36-48.

Van Gent, M. R., & Van der Werf, I. (2010). Stability of breakwater roundheads during construction. *Coastal Eng*, 32, 1-15.

Vidal, C, M.A. Losada and R. Medina. (1991). Stability of mound breakwater's head and trunk, *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg, ASCE*, Vol. 177, No.6 Nov/Dec, pp.570-587.

Vidal, C., Losada, M. A., & Mansard, E. P. (1995). Stability of low-crested rubble-mound breakwater heads. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 121(2), 114-122.

Keywords: Damage Evolution; Hydraulic Stability; Breakwaters; Head Section.



PRELIMINARY ASSESSMENT OF THE BEHAVIOUR OF MATTRESSES AND ROCK DUMPING FOR SUBMARINE CABLE PROTECTION AT THE PORTUGUESE COAST

Suha IBRAHIM, Filipe MIRANDA, Tiago FERRADOSA, Francisco TAVEIRA-PINTO,
Paulo ROSA-SANTOS

Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto, Portugal Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental da Universidade do Porto, Portugal

up202308607@fe.up.pt; up201706240@edu.fe.up.pt; tferradosa@fe.up.pt; fpinto@fe.up.pt; pjrsantos@fe.up.pt

INTRODUCTION

The expansion of offshore renewable energy assets and interconnector infrastructure has driven a growing demand for reliable submarine cable protection systems in coastal and port environments. Conventional approaches, such as rock dumping and concrete mattresses, have been widely adopted; however, these solutions may present ecological limitations and long-term maintenance challenges. Nature Inclusive Solutions (NIS) have emerged as an innovative alternative, designed to combine structural protection with ecological enhancement by promoting biodiversity and habitat creation on the seabed.

Despite the growing interest in NIS, their hydrodynamic performance under wave action in shallow-water environments remains insufficiently studied, particularly when compared against conventional methods under identical conditions. The Portuguese Offshore Renewable Energy Allocation Plan (PAER), targeting 2 GW of floating offshore wind capacity by 2030, considers four commercial deployment maritime zones: Viana do Castelo, Leixões, Figueira da Foz, and Sines. In this context, the northern coast of Portugal, represents a relevant case study due to its exposure to North Atlantic conditions and the planned submarine cable corridors to serve the future offshore infrastructure.

This study aims to evaluate and compare the performance of two submarine cable protection solutions under irregular wave conditions through physical modelling: (i) NIS mattresses and (ii) conventional rock dumping. The specific objectives include: assessing the protective effectiveness of each solution in terms of cable stability and bed morphology changes; quantifying erosion and deposition patterns around the protected and unprotected cable configurations; and evaluating the comparative advantages of NIS over traditional methods in a controlled hydraulic environment.

METHODOLOGY

This study considered as reference the submarine cable corridor planned to serve the Leixões offshore deployment area. A typical cross section profile from Granja Beach was used as reference for the physical model study. Since very close to the shore submarine cables are typically buried and in deep waters wave effects are neglectable, in this initial study a nearshore stretch covering the transition from “buried cable” to “seabed-supported cable” was selected. At the selected site, the reference water depth was -10.0 m CD while the seabed was reproduced by a simplified profile composed of two slopes of circa 3.3‰ and 3.4‰.

The physical model tests were conducted in the wave basin (28.0 m long and 12.0 m wide) of the Hydraulics Laboratory of the Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP). A 2.35 m wide wave channel was materialized inside the wave basin to test the physical model built at a geometric scale of 1:25, following Froude similarity. The seabed bathymetry was prepared with SP55 silica

sand ($d_{50} = 0.273$ mm) while the submarine cable was modelled as a cylindrical element of 16 mm diameter (corresponding to a 400 mm prototype diameter).

A total of seven configurations were assessed across two testing phases. Phase 1 comprised four straight cable configurations (parallel to wave propagation): (i) no cable, (ii) the bare unprotected cable as a baseline, (iii) NIS mattress protection, and (iv) the rock dumping protection. Phase 2 comprised three oblique incident configurations (12° angle between the cable alignment and the waves' direction), representing a more realistic case: (v) the bare cable baseline, (vi) NIS mattress protection, and (vii) the rock dumping. The inclusion of the bare cable scenario in both orientations provided a consistent reference to quantify the protective effectiveness of each solution. The dimensions of the NIS mattresses were $160 \times 100 \times 12$ mm (prototype: $4.0 \times 2.5 \times 0.30$ m). The rock dumping used graded stones with $D_{n50} = 10 - 14$ mm (prototype: 250 – 350 mm). All configurations were subjected to the same sea state to ensure a consistent comparison basis (Figure 1). That sea state was selected considering the local wave conditions, the physical wave breaking limits and the performance characteristics of the wavemaker.

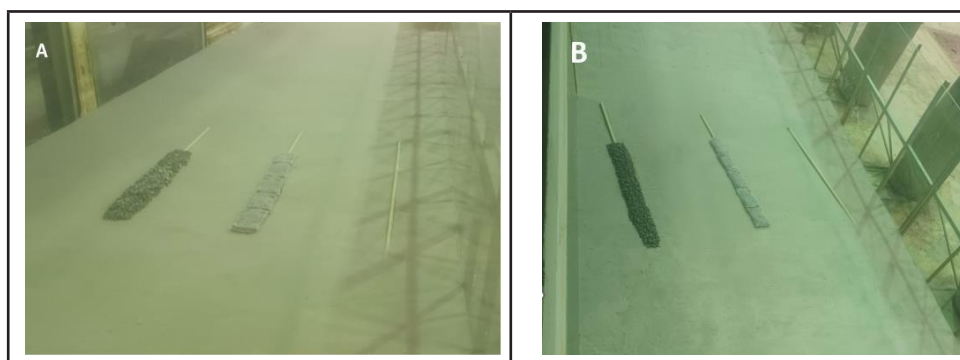


Figure 1 – Overview of the test configurations in the wave flume: (A) straight cable orientation with bare cable, NIS mattress, and rock dumping from left to right; (B) oblique cable orientation with the same three protection scenarios.

The hydrodynamic loading consisted of irregular waves (JONSWAP spectrum) with a significant wave height, H_{m0} , of 0.18 m (prototype: 4.5 m) and a peak wave period, TP , of 3.6 s (prototype: 18.0 s), corresponding to a peak frequency, f_P , of 0.278 Hz. A total of 5000 irregular waves were generated per test through four consecutive runs (one S12 series and three S13 series) for a water level corresponding to CD. The valid frequency range of the wave spectrum was determined as 0.139 Hz to 0.556 Hz ($0.5f_P$ to $2.0f_P$).

The water free surface oscillation was monitored using resistance-type wave probes installed along the wave flume. Four wave probes were positioned before the bathymetric profile to record the free surface elevation aiming for a subsequent spectral analysis and reflection quantification, and a fifth probe was added at 12.83 m from the paddles (at the cable location) for the oblique configuration tests. Bed morphology changes were quantified using a 3D FARO laser scanner and analyzed through the Cloud-to-Cloud (C2C) distance method, employing absolute mode with a Blue-White-Red diverging colormap to distinguish erosion (red, down to -0.02 m) from deposition (blue, up to +0.03 m), Figure 2.

CONCLUSIONS

Experimental results indicated higher structural stability for NIS mattresses, which showed no displacement, whereas rock dumping experienced edge scattering. Bed morphology was characterized by wave-induced ripple migration and generalized deposition. Deposition was symmetric in the straight configuration but became notably asymmetric in the oblique scenario due to complex flow-cable interactions. Overall, the oblique alignment triggered more significant bed



redistribution, demonstrating that cable orientation significantly influences both scour development and the effectiveness of the protection solutions.

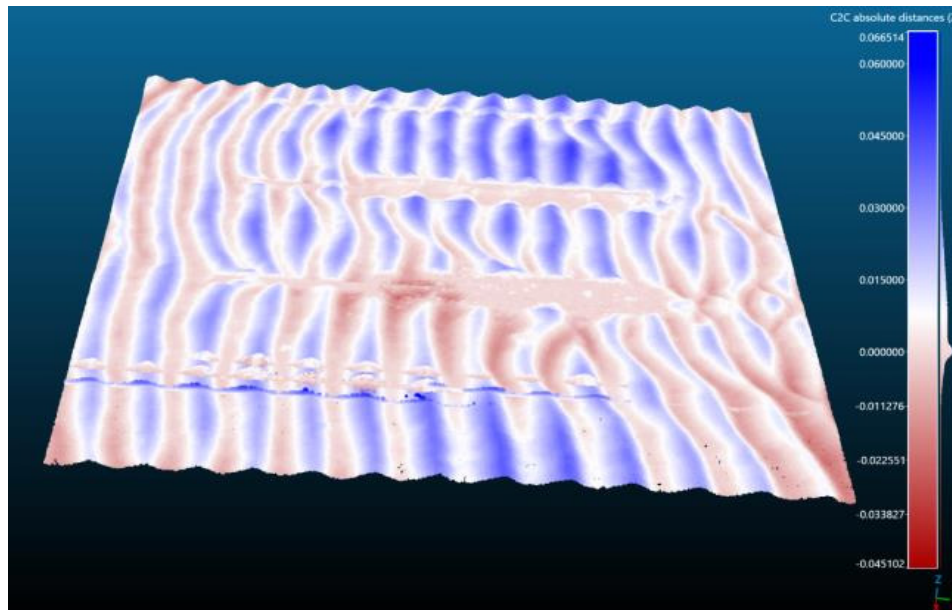


Figure 2 - Cloud-to-Cloud (C2C) absolute distance map showing bed morphology changes after wave action, with red indicating scour (erosion) and blue indicating accretion (deposition).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the support from the project SEACARE (NORTE2030-FEDER-00884300) co-funded by FEDER through Norte 2020/2030 and Portuguese national funds, through FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, IP.

Keywords: Subsea infrastructure protection; Physical modelling; Nature Inclusive Solutions; bed morphology; scour and accretion characterization.

INTEGRATING NUMERICAL MODELING AND MACHINE LEARNING FOR COASTAL FLOOD PREDICTION AND BREAKWATER LAYOUT OPTIMIZATION

Moeketsi DUIKER^{1,2}, Victor RAMOS^{1,2}, Jaime dos SANTOS CARDOSO³, Francisco TAVEIRA-PINTO^{1,2}, Paulo ROSA-SANTOS^{1,2}

1. Department of Civil Engineering and Georesources, FEUP-Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, up201710584@fe.up.pt, jvramos@ciimar.up.pt, fpinto@fe.up.pt, pjsantos@fe.up.pt

2. Interdisciplinary Centre of Marine and Environmental Research of the University of Porto (CIIMAR), Avenida General Norton de Matos, s/n, Matosinhos, 4450-208, Portugal

3. Institute for Systems and Computer Engineering, Technology and Science (INESC TEC) and Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, jsc@fe.up.pt

INTRODUCTION

Coastal zones are increasingly exposed to erosion, wave overtopping, and flooding due to the combined effects of climate change and growing anthropogenic pressures [1]. These challenges demand advanced, data-driven tools capable of supporting efficient planning and management of coastal defenses. Furthermore, the growing availability of high-resolution data and computational resources has created new opportunities to integrate artificial intelligence into coastal engineering practices. Traditional numerical approaches, while accurate, are often computationally expensive and time-consuming, limiting their applicability in real-time decision-making [2]. In this context, machine learning-based surrogate models offer a promising alternative for rapid prediction and scenario analysis, supporting more adaptive and resilient coastal management strategies [3]. This study presents an integrated framework that combines high-fidelity numerical modeling with machine learning (ML) techniques to enhance the prediction and mitigation of coastal flooding.

METHODOLOGY

A dataset was generated using the SWASH (Simulating Waves till Shore) numerical model [4] to simulate coastal flooding under different configurations of two vertical detached breakwaters. These were selected instead of rubble-mound breakwaters to simplify the randomized placement of structures during dataset generation. All simulations were conducted under a single hydrodynamic condition corresponding to the 2014 storm event in Furadouro, a highly vulnerable urban coastal area [5]. This event was selected as a representative extreme scenario. The simulations produced spatial flood extent maps, which were used to develop the ML models.

Two complementary ML models were implemented. The Convolutional Neural Network (CNN) used flood maps as image input to predict the optimal breakwater locations (X and Y coordinates), directly exploiting spatial patterns. In contrast, the Extreme Gradient Boosting (XGB) model used a tabular dataset, in which breakwater positions served as inputs to predict the flooded area, reflecting the inverse relationship. This combined approach enables both forward prediction and inverse design (Fig. 1).

Both models were trained using 5-fold cross-validation to ensure robustness. Several preprocessing strategies were evaluated, including normalization, feature engineering, and variations in image resolution and color representation, to identify the most effective configurations for each model.

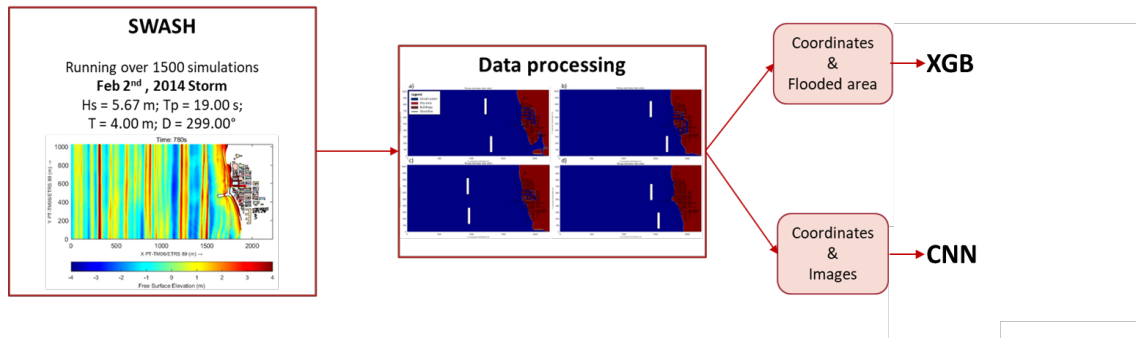


Figure 1. The workflow from running 1,500 simulations in SWASH to training and testing ML models.

RESULTS

The developed framework addresses two key tasks: (i) predicting flooded area (as a number in hectares and not a map) for given breakwater configurations and hydrodynamic conditions, and (ii) estimating optimal breakwater positioning based on target flood patterns. The findings indicate that for the CNN, three-dimensional RGB images with a moderate resolution of 64×64 pixels yielded the best performance, whereas for XGB, normalizing the dataset to a 0–1 range resulted in superior predictive accuracy. Results presented in Fig. 2 demonstrate that the CNN model outperforms XGB in capturing complex spatial relationships, achieving higher accuracy ($R^2 = 0.75$) and better generalization across unseen scenarios as reflected by its performance on the test dataset ($R^2 = 0.77$). These results provide a representative overview of the models' capabilities, with additional performance analyses and scenario-based evaluations further supporting the robustness of the proposed framework.

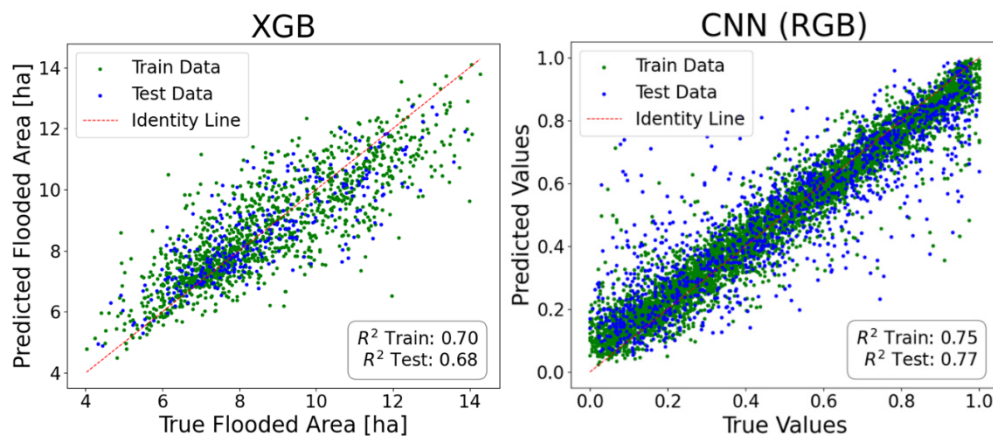


Figure 2. The scatter plot of true values of the flooded area versus predicted values from the XGB model, and the scatter plot of normalized true values of the coordinates versus predicted values from the CNN model (for training and testing).

CONCLUSIONS

This research contributes to the integration of artificial intelligence in coastal zone management by providing a fast, reliable surrogate modeling approach that can significantly reduce computational costs associated with traditional numerical simulations. The proposed methodology supports decision-making in the design and optimization of coastal protection measures, aligning with current needs for climate adaptation, digitalization, and sustainable coastal planning in Portuguese-speaking countries and beyond.

The current results demonstrated the potential of ML models to effectively support coastal flood prediction and the design of mitigation measures by capturing complex, nonlinear relationships



within the data. In particular, the superior performance of the CNN highlights the importance of preserving spatial information when modeling flood dynamics. Despite these promising outcomes, the models remain dependent on the quality, diversity, and representativeness of the training data, which may limit their applicability under significantly different conditions. As a result, the framework's robustness and applicability can be enhanced by incorporating a broader spectrum of hydrodynamic boundary conditions, including projected sea level rise, thereby supporting more realistic and policy-relevant coastal planning solutions.

Palavras-Chave: Coastal Flooding; SWASH; Coastal Risks; Coastal Defense; Machine Learning

REFERENCES

- [1] Ferreira, A.M., Coelho, C., Narra, P. (2021). Coastal erosion risk assessment to discuss mitigation strategies: BarraVagueira, Portugal. *Natural Hazards*, 105, 1069–1107. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04349-2>
- [2] Bermúdez, M., Cea, L., Puertas, J. (2019). A rapid flood inundation model for hazard mapping based on least squares support vector machine regression. *Journal of Flood Risk Management*, 12, e12522. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12522>
- [3] Duiker, M. L., Ramos, V., Taveira-Pinto, F., Rosa-Santos, P. (2025). Predicting Coastal Flooding and Overtopping with Machine Learning: Review and Future Prospects. *Journal of Marine Science & Engineering*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/jmse13122384>
- [4] 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. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2011.05.015>
- [5] Coelho, C., Lima, M., Alves, F. M., Roebeling, P., Pais-Barbosa, J., Marto, M. (2023). Assessing coastal erosion and climate change adaptation measures: a novel participatory approach. *Environments*, 10(7), 110. <https://doi.org/10.3390/environments10070110>





XII CPGZC

**SERVIÇOS DE ECOSSISTEMAS E RESILIÊNCIA
COSTEIRA**



OS CURSOS TÉCNICOS DE DRAGAGENS COMO PLATAFORMA DE TRANSFERÊNCIA DE CONHECIMENTO PARA A GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS

Maria Manuel CRUZ¹, Carlos COELHO², José L. CACHO³, Luís M. PINHEIRO⁴, Márcia LIMA^{5,2}, Paulo A. SILVA⁶, Rui PAIVA⁷

1. Porto de Aveiro

2. CERIS & Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 3810-193, Portugal, ccoelho@ua.pt

3. Rua José Afonso, 48-4.ºDt 3800-438 Aveiro, luiscacho7@gmail.com

4. CESAM & Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, Aveiro, 3810-193, Portugal, lmp@ua.pt

5. Universidade Lusófona (Centro Universitário do Porto), 4000-098, Porto, Portugal, marcia.lima@ulusofona.pt

6. CESAM & Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Aveiro, 3810-193, Portugal, psilva@ua.pt

7. Rua Francisco Sá Carneiro, 637, 2. Esq. 4450-676 Matosinhos, ruigpaiva@gmail.com

INTRODUÇÃO

As zonas costeiras enfrentam desafios crescentes associados à erosão costeira, às alterações climáticas, ao défice sedimentar e à necessidade de assegurar condições adequadas de navegabilidade, exigindo abordagens cada vez mais integradas de planeamento e gestão. Neste contexto, as dragagens assumem um papel estratégico, quer no funcionamento das infraestruturas portuárias, quer na gestão sedimentar e na proteção do litoral. A crescente complexidade destas intervenções implica a articulação entre diferentes áreas do conhecimento e entre diversos intervenientes, incluindo universidades, administrações portuárias, entidades públicas, empresas e projetistas. Neste enquadramento, as iniciativas de formação e discussão técnico-científica podem desempenhar um papel relevante na transferência de conhecimento entre os diferentes intervenientes do setor. O presente trabalho analisa a evolução dos conteúdos técnico-científicos das três edições dos Cursos Técnicos de Dragagens, promovidos pela Universidade de Aveiro e pela Administração do Porto de Aveiro, procurando compreender de que forma esta iniciativa acompanhou a evolução das prioridades da gestão costeira em Portugal. Esta avaliação dará suporte à preparação da quarta edição do curso, a realizar no início de 2027.

OS CURSOS TÉCNICOS DE DRAGAGENS

Os Cursos Técnicos de Dragagens realizaram-se em 2009, 2013 e 2021, resultando de uma iniciativa conjunta entre a Universidade de Aveiro e a Administração do Porto de Aveiro, em colaboração com o setor empresarial. A primeira edição teve como tema principal, os *Fundamentos, Técnicas e Impactos das Dragagens*. Na segunda edição, o mote principal foram as *Questões Ambientais e Monitorização*. A terceira edição discutiu a *Sustentabilidade do Litoral*. Todas as edições reuniram entre 100 a 150 participantes, provenientes da academia, administrações portuárias, entidades públicas, empresas de dragagens, projetistas, consultores e estudantes, evidenciando a capacidade da iniciativa para mobilizar os principais intervenientes do setor.

Cada edição deu origem à publicação de um livro técnico que reúne os principais contributos apresentados durante os cursos, constituindo um registo da evolução do conhecimento produzido. Estes três livros técnicos (Coelho *et al.*, 2011; Coelho *et al.*, 2018; Coelho *et al.*, 2026) constituem a base documental da análise apresentada neste trabalho.



EVOLUÇÃO DOS CONTEÚDOS TÉCNICOS E ALINHAMENTO COM OS DESAFIOS DA GESTÃO COSTEIRA

A análise comparativa dos conteúdos publicados nos três livros técnicos evidencia uma evolução consistente das temáticas abordadas, acompanhando a própria evolução das questões relacionadas com as operações de dragagem e as prioridades associadas à gestão costeira em Portugal (Tabela 1).

A Tabela 1 evidencia que a evolução observada não corresponde apenas à introdução de novos temas, mas sobretudo a uma alteração da forma como as dragagens passaram a ser enquadradas, evoluindo de uma atividade predominantemente técnica para um instrumento de gestão sedimentar e de apoio à sustentabilidade das zonas costeiras. Paralelamente, observa-se uma crescente valorização da monitorização, da reutilização de sedimentos, da modelação e da integração entre conhecimento científico e experiência operacional, refletindo a necessidade das operações de dragagem se adaptarem aos desafios emergentes da gestão costeira.

Tabela 1 – Evolução dos conteúdos técnico-científicos das três edições dos Cursos Técnicos de Dragagens e respetivo contributo para a gestão costeira.

Edição	Principais eixos temáticos	Evolução do enquadramento das dragagens	Contributo para a gestão costeira
2009	Equipamentos; processos sedimentares; monitorização; impactes; aplicação de dragados	Atividade técnica essencial à navegabilidade e às infraestruturas portuárias	Consolidação dos fundamentos técnicos das dragagens
2013	Operações portuárias; monitorização; gestão e aplicação de dragados; impactes ambientais	Operação técnica integrada em preocupações ambientais e de monitorização	Integração das componentes ambientais no planeamento e execução das dragagens
2021	Alimentação artificial; gestão costeira; modelação; gestão sedimentar; sustentabilidade; casos de estudo	Instrumento de gestão sedimentar e de apoio à gestão sustentável das zonas costeiras	Promoção de soluções integradas para a gestão sedimentar e sustentabilidade do litoral

CONTRIBUTO PARA A TRANSFERÊNCIA DE CONHECIMENTO E PERSPETIVAS FUTURAS

Ao longo das três edições, os Cursos Técnicos de Dragagens promoveram um espaço de diálogo entre conhecimento científico e experiência operacional, favorecendo a discussão de soluções para desafios concretos da gestão costeira. O formato de realização dos cursos, com grupos de palestras convidadas, com 2 ou 3 oradores, e discussão alargada após cada grupo de palestras, facilitou o debate aberto e a partilha de conhecimento.

A publicação dos três livros técnicos permitiu consolidar e preservar o conhecimento produzido, reunindo contributos da academia e do setor empresarial e divulgando casos de estudo representativos da realidade nacional, abrangendo diferentes portos, zonas costeiras e intervenções de gestão sedimentar. Desta forma, a iniciativa ultrapassou o âmbito dos próprios cursos, assegurando a disseminação e continuidade do conhecimento produzido.

A preparação da quarta edição representa uma oportunidade para dar continuidade a esta trajetória, reforçando a discussão de temas emergentes relacionados com a gestão sedimentar, a sustentabilidade das intervenções, a inovação tecnológica e a transformação digital aplicadas às dragagens e à gestão costeira. Pretende-se igualmente promover uma participação mais alargada de especialistas e instituições dos países de expressão portuguesa, favorecendo a partilha de experiências e boas práticas sobre desafios comuns associados à navegabilidade, proteção costeira, adaptação às alterações climáticas e gestão portuária, incluindo também a incorporação das novas tecnologias ao serviço das operações de dragagem.



CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem concluir que iniciativas técnico-científicas desta natureza podem contribuir para a gestão das zonas costeiras através de três mecanismos complementares: (i) promovendo a atualização técnica dos profissionais face aos desafios emergentes da gestão costeira; (ii) criando um espaço de diálogo entre academia, administrações portuárias, entidades públicas, empresas e projetistas, favorecendo a integração de diferentes perspetivas técnicas; e (iii) assegurando a disseminação e preservação do conhecimento produzido através da publicação de livros técnicos e da divulgação de casos de estudo representativos da realidade nacional.

Neste contexto, os Cursos Técnicos de Dragagens afirmam-se como uma plataforma consolidada de transferência de conhecimento, contribuindo não apenas para a disseminação do conhecimento técnico-científico, mas sobretudo para a sua integração entre os diferentes intervenientes do setor e para a sua aplicação na prática profissional. A continuidade da iniciativa e a preparação da quarta edição constituem uma oportunidade para reforçar a cooperação técnico-científica entre especialistas e instituições dos países de expressão portuguesa, promovendo uma resposta mais integrada aos desafios associados à gestão sedimentar e à sustentabilidade das zonas costeiras.

REFERÊNCIAS

Coelho, C., Silva, P. A., Pinheiro, L. M. e Gonçalves, D. S. (Eds.) (2011). *Dragagens: Fundamentos, Técnicas e Impactos*. UA Editora Universidade de Aveiro, Aveiro. 279 p. ISBN 978-972-789-346-1.

Coelho, C., Silva, P. A., Pinheiro, L. M. e Gonçalves, D. S. (Eds.) (2018). *Dragagens: Questões Ambientais e Monitorização*. UA Editora Universidade de Aveiro, Aveiro. 204 p. ISBN 978-972-789-535-9.

Coelho, C., Silva, P. A., Pinheiro, L. M. e Lima, M. (Eds.) (2026). *Dragagens: Sustentabilidade do Litoral*. UA Editora Universidade de Aveiro, Aveiro. 237 p. ISBN 978-972-789-970-8. <https://doi.org/10.48528/q2d0-zh09>.

Palavras-Chave: Gestão sedimentar; Sustentabilidade do litoral; Formação técnica especializada; Cooperação técnico-científica; Comunidade dos Países de Língua Portuguesa.



MULTI-SCALE ASSESSMENT OF ECOSYSTEM SERVICES UNDER CLIMATE AND ANTHROPOGENIC PRESSURES ALONG THE NORTH WEST COAST OF PORTUGAL

Jacinto CUNHA¹, Edna CABECINHA², Sebastian VILLASANTE³, Stefano BALBI^{4,5},
Michael ELLIOTT^{6,7}, Sandra RAMOS^{1,8}

1. CIIMAR – Interdisciplinary Centre of Marine and Environmental Research, University of Porto, Matosinhos, Portugal, jcunha@ciimar.up.pt

2. CITAB/Inov4Agro – Centre for Research and Technology of Agro-Environmental and Biological Sciences, University of Trás-os-Montes and Alto Douro, Vila Real, Portugal, edna@utad.pt

3. Opportunius Research Professor, EqualSea Lab - CRETUS, Department of Applied Economics, University of Santiago de Compostela, Spain. sebastian.villasante@usc.es

4. Basque Centre for Climate Change (BC3), Sede Building, Campus EHU/UPV, Leioa, Bizkaia, Spain.

5. IKERBASQUE, Basque Foundation for Science, Bilbao, Bizkaia, Spain. Stefano.balbi@bc3research.org

6. School of Environmental and Life Sciences, University of Hull, HU6 7RX, UK

7. International Estuarine & Coastal Specialists (IECS) Ltd, Leven HU17 5LQ, UK. Mike.Elliott@hull.ac.uk

8. Biology Department, Faculty of Sciences, University of Porto, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007, Portugal, ssramos@ciimar.up.pt

INTRODUCTION

The accelerating expansion of maritime activities, combined with the intensifying impacts of climate change, is placing increasing pressure on coastal and marine ecosystems worldwide. These pressures threaten the capacity of ecosystems to provide Ecosystem Services (ES) and associated Societal Goods and Benefits (SGB), highlighting the urgent need for effective Ecosystem-based Management (EBM). In this context, this study presents a transdisciplinary assessment of Regulation and Maintenance Ecosystem Services (RMES) along the northwestern coast of Portugal, evaluating their ecological foundations, spatial distribution, vulnerability to climate change, and exposure to cumulative anthropogenic pressures (Figure 1).

RESULTS

This work addressed critical knowledge gaps concerning the ecological basis of ES supply in coastal and marine systems by identifying direct and indirect ecological contributors supporting RMES provision. Results demonstrated the central role of lower trophic levels in sustaining ecosystem functioning, with planktonic groups, particularly phytoplankton and zooplankton, emerging as key indirect contributors to ecological functions underpinning RMES supply. Certain functions, such as benthic primary production, exhibited relatively low resistance due to dependence on a limited number of biological groups. In contrast, functions including suspended matter filtration and refuge habitat provision were supported by a greater diversity of taxa, increasing ecosystem resistance to external pressures.

Spatial analyses identified statistically significant hotspots and coldspots of RMES provision along the NW Portuguese coast, while also evaluating regional multifunctionality and potential ES/SGB bundles. Approximately 20% of the study area was classified as RMES hotspots and 28% as coldspots. Hotspots were mainly concentrated in coastal and estuarine systems, with three major marine regions exhibiting particularly high RMES provision. Although 39% of areas identified as important for RMES supply overlapped with existing protected areas, only 30% of marine RMES hotspots currently fall within Marine Protected Areas (MPAs), revealing important conservation gaps.

Estuarine saltmarshes were identified as valuable RMES hotspots, particularly regarding carbon storage and sequestration. Carbon stock assessments conducted in the estuaries of the Minho,

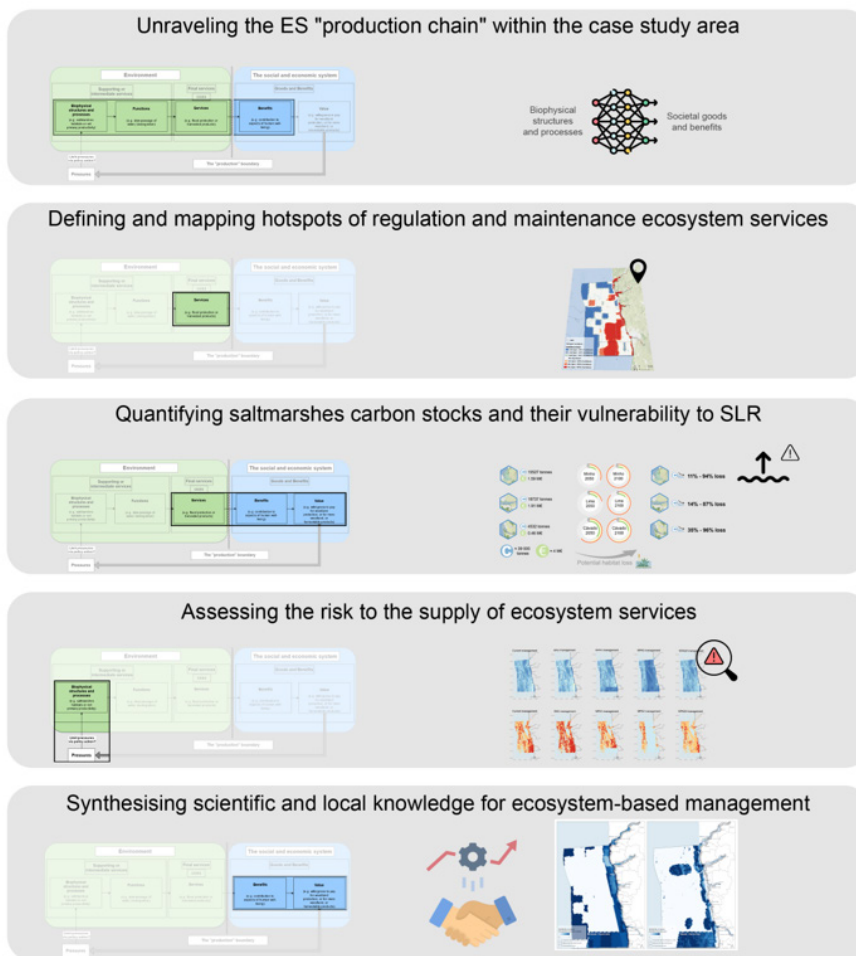


Figure 1. Overview of the transdisciplinary approach follow in this study.

Lima, and Cávado rivers estimated a combined stock of $38,798 \pm 2,880$ tonnes of organic carbon, corresponding to an estimated value of $\text{€}3.96 \pm 0.38$ million based on 2023 carbon market prices. Significant interspecific and regional differences were identified, with *Spartina patens* and *Phragmites australis* in the Lima estuary exhibiting the highest carbon stocks per unit area. Climate vulnerability analyses demonstrated contrasting regional responses to sea-level rise (SLR). Lima saltmarsh displayed greater resistance to inundation, whereas the Cávado estuary was identified as highly vulnerable under Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Shared Socioeconomic Pathways (SSPs). Projected habitat losses ranged from 11% to 96%, potentially generating CO₂ emissions between 22,000 and 130,000 tonnes under the high-emission SSP5-8.5 scenario.

To evaluate cumulative ecosystem vulnerability, a risk-based assessment framework was applied to examine the combined effects of anthropogenic activities and climate change under multiple management narratives and IPCC SSP scenarios. Beaches, aphotic zones, and estuaries emerged as the most vulnerable ecosystems along the NW Portuguese coast. Major risk drivers included increasing sea surface temperature, sea-level rise and storm exposure, fishing pressure, tourism, artificial infrastructures, and maritime transport. Spatial variations in ecosystem risk were more strongly influenced by management scenarios than by climate scenarios alone, emphasizing the importance of governance and management strategies in mitigating future ecosystem degradation.

Stakeholder perceptions and priorities regarding RMES were also assessed through participatory approaches involving representatives from four societal sectors. Sixteen out of twenty RMES evaluated were classified as “Very Important” particularly erosion control, water flow regulation and coastal protection, maintenance of nursery and breeding habitats, refuge and feeding habitats, water quality regulation, and climate regulation. Estuarine and coastal areas were consistently identified as



priority zones for RMES provision, while fishing, tourism, and offshore wind farm development were recognized as potential major sources of pressure and potential spatial conflicts. Stakeholders' long-term vision aligned closely with current policy objectives, emphasizing the need for EBM approaches capable of sustaining natural capital, ecosystem resilience, and socio-economic development.

CONCLUSION

Overall, this study provides a comprehensive multi-scale assessment of RMES supply, ecosystem vulnerability, and cumulative risk along the NW coast of Portugal. By integrating ecological, climatic, spatial, and socio-economic dimensions, this work contributes a holistic framework to support adaptive and risk-informed coastal and marine management, reinforcing the urgency of implementing integrated EBM strategies that prioritize RMES conservation and strengthen ecosystem resilience under future climate change scenarios.

Keywords: Ecosystem-based Management; Marine Spatial Planning; Socio-cological systems; Climate Change; Risk Assessment



COCREATED FUTURE SCENARIOS FOR WETLAND HABITAT RESTORATION IN A COASTAL LAGOON: INTEGRATING PARTICIPATORY MAPPING AND THE INVEST BLUE CARBON MODEL

Lamara S. CAVALCANTE¹, Diógenes F. S. COSTA³, Sebastian VILLASANTE², Ana I. SOUSA¹, João P. COELHO¹, Ana I. LILLEBØ¹

¹Cesam, Department of Biology, Aveiro University, Campus of Santiago, University District- Zip cod 3810- 198, Aveiro, Portugal.

²Department of Economic Analysis of Markets and Institutions, CRETUS – Centre for Research in Environmental, Economic and Technological Studies, University of Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, Galicia, Spain

³ Department of Geography, Center for Human Sciences, Letters and Arts, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brazil.

Author correspondence: lamaracavalcante@ua.pt

ABSTRACT

This study assesses the blue carbon sequestration potential associated with cocreated future restoration scenarios for two vegetated coastal habitats: salt marshes and seagrass meadows in the Ria de Aveiro (Portugal). Following an initial assessment of current conditions, future scenarios were developed through a participatory Living Lab process in which stakeholders identified and prioritised areas for habitat restoration using spatial mapping of EUNIS habitat types. These stakeholders defined restoration areas were then translated into prospective scenarios and analysed using the InVEST Coastal Blue Carbon model (versão 3.4.0/Copyright©2023) to compare current conditions with a future restoration horizon projected for 2035.

Habitat extent and carbon storage were analysed spatially to explore how targeted restoration could influence the lagoon's carbon balance at the landscape scale. The results indicate that salt marshes exhibit higher carbon storage efficiency per unit area, while seagrass meadows contribute meaningfully to systemlevel carbon gains through spatial expansion. Changes in preexisting habitat classes reflect a functional transition within the system, whereby areas with lower carbon storage capacity are converted into vegetated habitats with greater blue carbon sequestration potential.

Overall, the study demonstrates that restoration strategies grounded in participatory, placebased scenario development can enhance blue carbon stocks while supporting transparent and socially robust decisionmaking. By integrating stakeholderdriven spatial prioritisation with blue carbon modelling, the approach provides a replicable framework for guiding restoration planning in complex coastal lagoon systems.

Keywords: ecosystem services, blue carbon, habitat restoration, socio-ecology



CICLO URBANO DA ÁGUA E RESILIÊNCIA CLIMÁTICA EM GRÂNDOLA, PORTUGAL - INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E SOCIAL ALINHADA COM A NATUREZA

Alvarina PINTO SERRANO¹, Vera SIMÕES², Manuela MOREIRA DA SILVA³

1. Instituto Superior de Engenharia, Universidade do Algarve, Campus Penha, 8005-139 Faro, a81114@ualg.pt

2. Instituto Superior de Engenharia, Universidade do Algarve, Campus Penha, 8005-139 Faro, a63955@ualg.pt

3. Instituto Superior de Engenharia, Universidade do Algarve. CIMA-ARNET. Campus Penha, 8005-139 Faro. msanti@ualg.pt; CEiiA, Centro de Engenharia e Desenvolvimento, Av. D. Afonso Henriques 1825, 4450-017 Matosinhos, Portugal.

INTRODUÇÃO

Situada no litoral Alentejano, à semelhança de outras cidades costeiras Mediterrânicas, Grândola tem enfrentado ao longo das últimas décadas aumento da temperatura média atmosférica e alteração dos padrões de precipitação, com diminuição acentuada da precipitação média e aumento da frequência de eventos curtos de precipitação muito intensa. As ondas de calor cada vez mais frequentes juntamente com a escassez de água, têm provocado diminuição dos níveis de conforto e da qualidade de vida da comunidade local, restringindo por exemplo, a circulação nos espaços públicos durante grande parte do dia durante vários meses no ano. Os espaços verdes de Grândola são escassos e pouco funcionais para as pessoas que os frequentam, e a vegetação urbana é muito condicionada pela falta de água para rega. Este estudo, integrado no Mestrado em Ciclo Urbano da Água da Universidade do Algarve, pretendeu contribuir para uma abordagem integrada da gestão da água e da natureza na cidade de Grândola, de forma a potenciar os serviços ecossistémicos dos espaços verdes, recorrendo o mais possível a origens alternativas de água na proximidade disponíveis para rega e reduzindo assim ao mínimo o recurso a água tratada para consumo humano. Considerou-se o período entre 2013 e 2023, recolheram-se dados das entidades gestoras, ERSAR, IPMA, APA e INE para caracterizar o Ciclo Urbano da Água (CUA) incluindo a estimativa das disponibilidades hídricas para usos potáveis e não potáveis. Escolheu-se este período por, regionalmente ser coincidente com uma reestruturação no setor das águas, e à escala municipal por ser representativo das atuais perdas de água nos sistemas, do limitado nº de contadores, e da ocorrência de avarias metrológicas. Consideraram-se os quatro espaços verdes mais relevantes na cidade, em termos de dimensões e de serviços ecossistémicos fornecidos. Selecionaram-se os edifícios públicos mais próximos desses espaços verdes. Utilizaram-se 3 Índices de Escassez Hídrica (Falkenmark, 2007; EEA, 2012; e Liao, 2024), para avaliar o cenário do atual CUA e o proposto com recurso a origens alternativas (água da chuva, água descartada das piscinas municipais e uso de ApR), evidenciando o cenário proposto os contributos das origens alternativas para que a cidade alcance uma maior resiliência hídrica. Fez-se uma 1ª caracterização dos principais espaços verdes da cidade, incluindo as espécies arbóreas e densidade relativa, e estimaram-se os respetivos serviços ecossistémicos (sequestro e armazenamento de carbono, produção de oxigénio, remoção de poluentes atmosféricos, e escoamento superficial evitado) com recurso a um modelo previamente validado (<https://www.itreetools.org/tools/i-tree-eco>). Os 3 Índices de Escassez Hídrica utilizados, variaram nos 2 cenários estudados entre *Escassez Absoluta* (Falkenmark, 1989) e *Escassez* (EEA, 2012; e Liao, 2024), e não parecem ajustados aos objetivos definidos, por não integrarem as variáveis consideradas fundamentais neste novo paradigma de CUA. Ficou evidenciada a necessidade da definição de um novo índice de escassez de água em ambiente urbano. Analisaram-se medidas de melhoria a implementar no CUA e as vantagens de se integrar a sua gestão com a otimização dos serviços ecossistémicos assegurados pelos espaços verdes de forma a aumentar a resiliência climática e a qualidade de vida das pessoas. Considera-se que Grândola é mais um caso de estudo que demonstra que o planeamento das cidades, em

particular das costeiras Mediterrânicas, deve evoluir para uma abordagem holística e integradora de inovação tecnológica e social mais alinhada com a Natureza.

Palavras-Chave: Alterações climáticas; cidades Mediterrânicas; serviços ecossistémicos; origens alternativas de água; neutralidade carbónica.

PRINCIPAIS RESULTADOS

Atualmente a única origem de água, para usos potáveis e não potáveis na cidade de Grândola é o aquífero Bacia do Tejo-Sado, que nesta zona piezométrica já apresenta sinais de sobreexploração (Figura 1) e de intrusão salina. Os consumos anuais correspondem a um total de 732 592 m³ com 24 % de perdas totais, e 68 835 m³ sendo consumos municipais dos quais aprox. metade são para a rega dos espaços verdes com os sistemas e a dotação de rega atualmente instalados. O uso de ApR não se mostrou viável, considerando a distância à ETAR, quantidade e qualidade do efluente tratado. Na situação atual considerou-se o recurso à água da chuva recolhida a partir dos telhados de 8 edifícios públicos selecionados, e as descargas da piscina municipal representam anualmente cerca de 6 000 m³ que, de acordo com a nossa estimativa atendendo à evapotranspiração, seriam mais do que suficientes para suprir as necessidades de rega dos 4 espaços verdes estudados (Tabela 1).

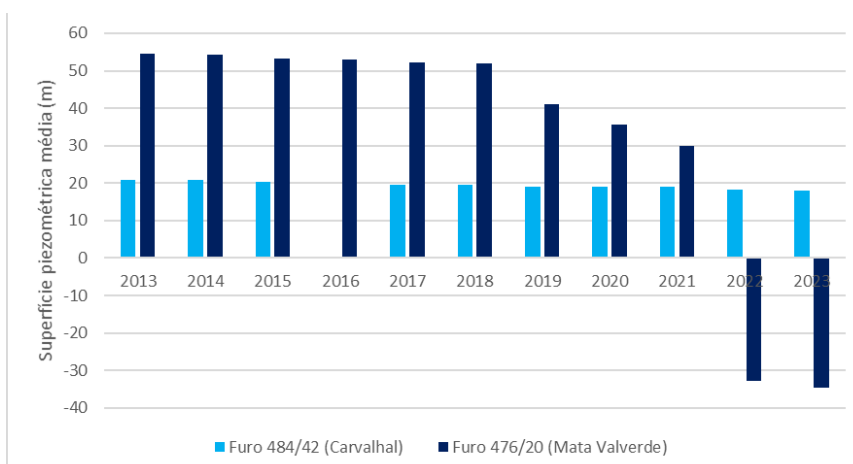


Figura 1. Evolução da superfície piezométrica do aquífero Bacia do Tejo-Sado/margem esquerda na zona e período considerados (IPMA, 2025).

As necessidades de rega dos espaços verdes foram obtidas através da determinação da evapotranspiração potencial por espaço verde, multiplicando-se a evaporação média de cada espécie pelo respetivo nº de árvores nesse espaço. No caso dos relvados, utilizou-se o consumo médio mensal para a mesma variedade de relva (0,0682 m³/m²) em campos de golfe no Algarve (Segun, 2025). O volume anual descartado de água da piscina foi obtido diretamente a partir dos registos da CMG.

As espécies arbóreas estudadas nestes espaços verdes, têm capacidades distintas e complementares para garantirem os diferentes serviços ecossistémicos na cidade, evidenciando a importância de se manter a biodiversidade urbana e de se ajustar a seleção das espécies ao local específico, de acordo com o funcionamento urbano e com as necessidades das pessoas.



Tabela 1. Espaços verdes da cidade de Grândola considerados neste estudo.

	Jardim Dr. José Jacinto Nunes	Jardim Dr. Júlio do Rosário Costa	Largo Catarina Eufémia	Jardim1º de Maio
Remodelação	2010	2010	2016	2018
Área total (m²)	1665	2607	1821	12150
Área impermeabilizada (%)	79	66	36	2
Área vegetada (%)	21	34	4	70
Área relvada (%)	0	0	60	28

Confirmando estudos anteriores (ex. Matias *et al.*, 2025) as árvores, de acordo com estas estimativas, mostraram-se muito importantes em Grândola na regulação dos ciclos da água e do carbono, na remoção de poluentes e na amenização da temperatura na cidade, pelo que a sua densidade deve ser reforçada. Demonstrou-se mais uma vez que, para haver resiliência climática, o planeamento urbano deve integrar o design e o funcionamento dos espaços verdes com a gestão do ciclo urbano da água. Que devem ser identificadas e incluídas origens alternativas de água para usos não potáveis, e que a dotação da rega dos espaços verdes deve ter por base dados reais e sistemas mais eficientes. Se assim for, poderemos dispor de espaços verdes diferenciadores para se enfrentar as ondas de calor, melhorando as condições exteriores de conforto e de segurança ambiental, particularmente relevante para comunidades urbanas cada vez mais envelhecidas e vulneráveis.

Como perspetivas futuras, pretende-se desenvolver estudos sobre índices urbanos de escassez hídrica, que integrem as dimensões física, ecológica, e social, fundamentais para uma melhor avaliação da sustentabilidade da gestão da água e da sua contribuição para resiliência climática das zonas urbanas.

REFERÊNCIAS

- European Environment Agency (2012). Water resources in Europe in the contexto of vulnerability. Acedido em junho de 2025 em: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/water-resources-and-vulnerability>
- Falkenmark M., Berntell A., Jägerskog A. Lundqvist J. (2007). On the Verge of a New Water Scarcity: A Call for Good Governance and Human Ingenuity Acedido em junho de 2025 em: https://www.researchgate.net/publication/42765865_On_the_Verge_of_a_New_Water_Scarcity_A_Call_for_Good_Governance_and_Human_Ingenuity
- Liao R. (2024). Water scarcity assessment index from the realistic perspective of human basic water requirements. *Environmental and Sustainability Indicators*, 22, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100404>
- Matias P., Moreira da Silva M., Teigão J., Duarte A. (2025). Urban Vegetation Benefits in Mediterranean Cities for Climate Change Adaptation and Water Usage Efficiency – A Case Study in Algarve, Portugal. *Front. Environ. Sci.* 13:1520934. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1520934>
- Segun. G (2025). Main Impacts of wastewater reuse for golf courses irrigation. Dissertação de Mestrado em Ciclo Urbano da Água, Universidade do Algarve. Main impacts of wastewater reuse for golf courses irrigation



XII CPGZC

RECURSOS E SUSTENTABILIDADE COSTEIRA



CONCEÇÃO DE UM ÍNDICE DE ADEQUABILIDADE PARA A AQUACULTURA OFFSHORE EM PORTUGAL

Bárbara PEIXOTO¹, Daniel CLEMENTE^{1,2}, Cristiana COSTA¹, Filipe MIRANDA^{1,2},
Tiago FERRADOSA^{1,2}, Paulo ROSA-SANTOS^{1,2}, Francisco TAVEIRA-PINTO^{1,2}

1. Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465, Porto, Portugal, up202109899@edu.fe.up.pt; up603010@up.pt; up202004529@edu.fe.up.pt; up201706240@edu.fe.up.pt; tferradosa@fe.up.pt; pjrsantos@fe.up.pt; fpinto@fe.up.pt

2. Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR), Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões, Av. General Norton de Matos s/n, 4450-208, Matosinhos, Portugal

INTRODUÇÃO

A nível mundial, a aquacultura superou a pesca extrativa em termos de produção (cerca de 51% para 49%, respetivamente) (FAO, 2024), uma tendência crucial não só para assegurar a procura crescente, mas também para compensar a sobre-exploração de espécies selvagens e as restrições impostas à pesca extrativa. Não obstante, projeta-se uma expansão do setor da aquacultura nos próximos anos, o que irá requerer novas áreas de exploração. A nível Europeu, existe uma grande dependência de importações de outras regiões do globo, em particular do Sudeste Asiático. No caso específico de Portugal, existe um consumo per capita três vezes superior à média Europeia, o que cria um défice significativo a nível nacional. No entanto, Portugal possui uma costa extensa e um historial vasto associado à exploração de recursos marinhos, aos quais se juntam a implementação recente de várias explorações de aquacultura. Por forma a fortalecer a produção nacional, reduzir o défice externo e promover a auto-suficiência, a aposta na aquacultura *offshore* surge como uma alternativa a explorar.

As explorações de aquacultura, em particular no mar, estão sujeitas a inúmeras restrições. Para além das tolerâncias das espécies ao ambiente circundante, face às condições meteoceânicas e físico-químicas (Mosqueira *et al.*, 2022), há que acautelar a compatibilidade com outros usos do espaço marítimo, desde zonas protegidas à pesca tradicional. A nível nacional, a gestão do espaço marítimo é feita através da Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos (DGRM) e dos instrumentos a ela afetos, desde o Plano de Situação do Ordenamento do Espaço Marítimo Nacional (PSOEM) (DGRM, 2025) à emissão de Títulos de Utilização do Espaço Marítimo. Estes são disponibilizados em plataformas online, incluindo em formato de geoportal, o que permite uma consulta atualizada dos usos do espaço marítimo nacional por intermédio de mapas interativos e informativos.

Pese embora existam riscos subjacentes a conflitos pelo uso do espaço marítimo, também há sinergias a explorar. Este é o caso das energias marinhas renováveis (EMR), que possuem um instrumento próprio integrado no âmbito do PSOEM: o Plano de Afetação para as Energias Renováveis (PAER). O mesmo prevê, até 2030, atingir uma capacidade instalada de EMR até 2 GW (DGRM, 2023). Como destacado pela Ocean Energy Systems (Ocean Energy Systems, 2022), há sinergias de interesse entre os setores afetos às EMR – por exemplo, eólicas offshore e energia das ondas – e o setor da aquacultura offshore. Considerando o potencial de Portugal em ambos os setores, explorar a co-localização torna-se pertinente, o que requer a identificação das áreas com maior potencial.

O presente trabalho procura estabelecer um Índice de Adequabilidade (IA) capaz de incorporar as várias condicionantes inerentes à exploração de espécies de aquacultura offshore, por forma a classificar, através de critérios simples mas robustos, as várias áreas da costa continental Portuguesa de acordo com a sua viabilidade (Costa *et al.*, 2026) coupled with the urgent need of transition to renewable energy sources, has led to a growing interest in innovative and sustainable uses of



marine space through the development of Marine Spatial Planning protocols. Offshore aquaculture and renewables are two sectors poised for significant growth along the Portuguese coast, a country with outstanding potential for both sectors. Therefore, this paper seeks to assess the technical and environmental feasibility of co-locating these two industries along the continental coastline. The study focused on identifying suitable sites for the farming of 3 key species – *Dicentrarchus labrax* (European Seabass). Recorrendo a ferramentas numéricas, como o Python e o QGIS, torna-se possível não só programar este IA, como sobrepor o mesmo com as áreas afetas ao PAER, por forma a identificar zonas de interesse para a co-localização dos dois setores em causa.

CASO DE ESTUDO

O estudo incidiu na identificação de locais adequados para o cultivo offshore de três espécies marinhas ao longo da costa portuguesa: o robalo europeu (*Dicentrarchus labrax*), o mexilhão do mediterrâneo (*Mytilus galloprovincialis*) e a macroalga, *Laminaria hyperborea*. A seleção destas espécies teve por base critérios ecológicos, económicos e operacionais, considerando fatores como as tolerâncias ambientais e o seu valor comercial em Portugal e na Europa.

Desenvolveu-se um IA com base em dados metoceanicos, limites de tolerância ambiental e condições ótimas de espécies de aquacultura, sobrepondo-se a outros usos do espaço marinho. O IA foi programado em ambiente Python (Jupyter Notebook), e os dados metoceanicos foram obtidos através do *Copernicus Marine Services* no período entre 1993 e 2021. Já os parâmetros analisados incluíram a temperatura, salinidade, nitratos, oxigénio dissolvido, velocidade de correntes e concentração de clorofila-a, tendo sido avaliados sazonalmente a três profundidades (0.5 m, 10 m e 20 m). Para cada um dos parâmetros calculou-se a média mensal ao longo dos anos, sendo que, posteriormente, estes dados foram agrupados por estações, calculando-se a média e o desvio padrão para cada estação. Desta forma, foram gerados ficheiros NetCDF correspondentes à média, e à média mais/menos o desvio padrão em cada profundidade. Em seguida, estes ficheiros foram importados para o QGIS por forma a permitir a visualização do IA em mapas espaciais das diferentes classes, conforme uma simbologia por tonalidades. Para o IA, considerou-se uma escala de 0 a 4, com 0 classificado como “Inadequado” - ou seja, os valores médios situam-se fora dos limites de tolerância mínimo ou máximo para a espécie -, a 4 como “Excelente”, em que todos os valores (médias $\pm$ desvios-padrão) situam-se dentro do intervalo ideal para cada espécie. Numa segunda fase, os resultados foram cruzados com quatro zonas do PAER, de modo a identificar as áreas de maior potencial de co-localização.

RESULTADOS

Os resultados relativos à distribuição geográfica do IA ao largo da costa continental Portuguesa mostram que:

- o robalo-europeu apresentou níveis elevados de adequabilidade em todas as profundidades estudadas e estações na zona Norte da costa continental Portuguesa, mas com bastantes limitações a Sul e a Sudoeste;
- o mexilhão-mediterrânico demonstrou uma extensa faixa costeira classificada como adequada em profundidades entre 10 a 20 m, estendendo-se de forma contínua ao longo da costa. Não obstante, a faixa adjacente à linha de costa evidenciou zonas de baixos IA (e.g., Sul de Peniche, Faro e Aveiro);
- a macroalga *Laminaria hyperborea* evidenciou condições ambientais favoráveis ao seu cultivo ao longo de toda a área de estudo, tendo potencial para a sua produção em regime offshore na costa portuguesa.

A sobreposição dos IAs das três espécies com as zonas do PAER revelou, com a exceção de Sines, que a costa continental Portuguesa apresenta um elevado potencial para a co-localização dos dois setores, Figura 1. Por outro lado, o cálculo dos desvios padrões e médias assume uma distribuição normal de variáveis críticas como a temperatura, a salinidade e a clorofila-a. Não obstante, existe variabilidade sazonal e de cariz assimétrico. Neste último ponto, a presença de tendências de longo prazo pode enviesar os resultados. Por exemplo, o aumento da temperatura do oceano é um elemento crítico para a sobrevivência das espécies, devido ao impacto das “ondas de calor marinhas”. Uma distribuição normal não é, por norma, eficaz a capturar a variabilidade inerente a estes padrões não-estacionários. Deste modo, os intervalos de adequabilidade podem estar pontualmente sobrestimados, havendo o risco de, por exemplo, se classificar agora como adequadas zonas sujeitas a condições térmicas futuras que excedam os limites de tolerância das espécies. Uma das mais afetadas por esta variável é a *Laminaria hyperborea*, cuja distribuição geográfica exhibe uma tendência de deslocação para águas mais frias, a Norte. Uma nova versão do IA está a ser preparada para acautelar melhor tanto os padrões sazonais como os de longo prazo.

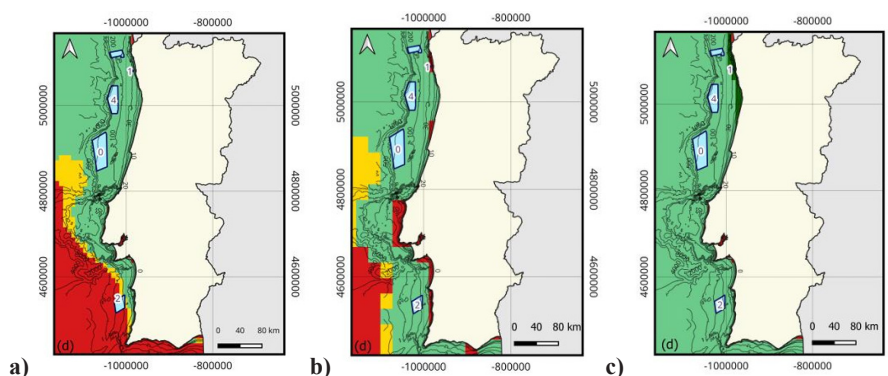


Figura 1- Cruzamento entre o PAER e o IA no Inverno, à profundidade de 10 m, para a) robalo; b) mexilhão e c) *Laminaria hyperborea*.

REFERÊNCIAS

- Costa, C., Miranda, F., Clemente, D., Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., Fazeres-Ferradosa, T., 2026. Exploratory study on offshore aquaculture suitability and co-location with marine renewable energy in Portugal. *Aquaculture* 619, 743888. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2026.743888>
- DGRM, 2025. PSOEM - Plano de Situação Ordenamento do Espaço Marítimo RCM [WWW Document]. URL <https://webgis.dgrm.mm.gov.pt/portal/apps/webappviewer/index.html?id=15c32cf0500c43148f97270db0c1f584> (accessed 7.4.25).
- DGRM, 2023. Plano de Afetação para Energias Renováveis Offshore (PAER). Ordenamento do Mar Português. URL <https://www.psoem.pt/plano-de-afetacao-para-energias-renovaveis-offshore/> (accessed 7.2.24).
- FAO, 2024. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Food and Agriculture Organization (FAO), United Nations. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- Mosqueira, M., Pombo, A., Borges, C., Brito, A.C., Zacarias, N., Esteves, R., Palma, C., 2022. Potential for Coastal and Offshore Aquaculture in Portugal: Insights from Physico-Chemical and Oceanographic Conditions. *Applied Sciences* 12, 23. <https://doi.org/10.3390/app12052742>
- Ocean Energy Systems, 2022. Offshore Aquaculture: a Market for Ocean Renewable Energy. OES, Europe.

Palavras-Chave: Aquacultura offshore; Planeamento do Espaço Marítimo; Energias Marinhas; QGIS; Python.

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE MICROBIOLÓGICA E IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SENSÍVEIS NO ESTUÁRIO DO MONDEGO

Ana Carla GARCIA^{1,2,3}, Bárbara CAMARÃO^{2,4}, Ana Cristina ROCHA^{2,3,5}

1. Ecletikpigment Unipessoal Lda, Malavado, S/N, Apartado 3756 7630-584 São Teotónio, epigment@outlook.pt

2. MARE Centro de Ciências do Mar e do Ambiente, <https://doi.org/10.54499/UID/04292/2025>

3. ARNET Rede de Investigação Aquática, <https://doi.org/10.54499/LA/P/0069/2020>

4. APA – Agência Portuguesa do Ambiente, barbara.camarao@apambiente.pt

5. Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, acsrocha@uc.pt

INTRODUÇÃO

A “Praia do Forte” localiza-se na cidade da Figueira da Foz, na freguesia de S. Julião e caracteriza-se por um areal de pequenas dimensões ladeado por dois pontões, o mais comprido a Norte, parte integrante da barra da foz do Rio Mondego e a Sul outro, de curta extensão (Figura 1). Por se situar dentro da barra do rio, a “Praia do Forte” presenteia os seus banhistas com águas calmas. Este facto, associado à sua localização e acessibilidade, faz com que a zona seja muito procurada durante a época estival.

Esta praia tem vindo a sofrer pressões que afetam a sua qualidade microbiológica, desconhecendo-se as fontes poluidoras responsáveis pela contaminação. Assim, em 2017, a Universidade de Coimbra conjuntamente com o Município da Figueira da Foz iniciou o primeiro programa de monitorização microbiológica do estuário do Mondego, com o objetivo de identificar fontes e riscos de poluição. Este programa, que se mantém até à presente data, visa decifrar a dinâmica de contaminação microbiológica num sistema caracterizado por uma densa interface entre fluxos fluviais, intrusões marinhas e pressões antropogénicas.

METODOLOGIA

Em 2017 estabeleceu-se uma rede de 11 pontos de amostragem distribuídos ao longo do estuário. Este programa de amostragem foi sujeito a atualizações periódicas até 2025, com a supressão ou adição de pontos de recolha baseada na análise progressiva dos resultados. A Figura 1 ilustra a totalidade dos pontos monitorizados entre 2017 e 2025.



Figura 1- Pontos que foram monitorizados entre 2017 e 2025.



A periodicidade da amostragem foi ajustada ao longo dos anos monitorizados. Inicialmente, realizou-se uma amostragem mensal; contudo, durante a época balnear, foi necessário intensificar a frequência, com recolhas quinzenais e, em alguns meses, semanais. Adicionalmente, em 2023, foram realizados perfis temporais detalhados através da análise de ciclos de maré, de 13 horas, com periodicidade semanal.

À exceção da monitorização de ciclos de maré (2023), na qual a amostragem foi realizada com periodicidade horária, as colheitas foram sempre realizadas numa janela de duas horas antecedendo o pico da baixa-mar (2017 a 2022 e 2024 – 2025), de forma a garantir que as águas amostradas fossem representativas das condições locais ou de montante.

Em cada amostragem foram medidos *in situ*, a uma profundidade sub-superficial, parâmetros físico-químicos (temperatura, salinidade, condutividade, pH e oxigénio (% e mg/L)), com recurso a uma sonda multiparamétrica YSI PRO DSS. Simultaneamente, foram recolhidas amostras de água em frascos esterilizados para análise dos parâmetros microbiológicos (*Escherichia coli* e *Enterococos* intestinais), definidos conforme os critérios de qualidade para águas balneares do Decreto-Lei nº135/2009 de 3 de junho, alterado pelo Decreto-Lei nº 113/2012 de 31 de maio.

O Decreto-Lei nº 135/2009 de 3 de junho alterado pelo Decreto-Lei nº 113/2012 de 23 de maio regula, entre outros, o regime de identificação, gestão, monitorização e classificação da qualidade das águas balneares (RJAB). No anexo I do Decreto-Lei nº 135/2009 e não alterado pelo Decreto-Lei nº 113/2012 estabelecem-se as normas de qualidade para as águas costeiras e de transição (Tabela 1).

Tabela 1- Norma de qualidade para águas de transição e costeiras (Decreto-Lei nº 135/2009 de 03 de junho).

PARÂMETRO MICROBIOLÓGICO	QUALIDADE		
	Excelente	Boa	Aceitável
Enterococos intestinais em UFC/100mL	100 (*)	200 (*)	185 (**)
Escherichia coli em UFC/100mL	250 (*)	500 (*)	500 (**)

(*) Com base numa avaliação do percentil 95 (ver anexo III DL 135/2009).

(**) Com base numa avaliação do percentil 90 (ver anexo III DL 135/2009).

Apesar das normas de qualidade serem aplicáveis, legalmente, apenas às praias classificadas como balneares, esta metodologia foi aplicada a todos os pontos amostrados ao longo do estuário do Rio Mondego, de forma a identificar as zonas mais sensíveis.

RESULTADOS

Os resultados obtidos entre 2017 e 2025 permitiram verificar que a poluição difusa associada a períodos de elevada precipitação é uma das causas de contaminação microbiológica do estuário. Foi também possível concluir que a zona do estuário a montante da Ponte Edgar Cardoso apresenta qualidade microbiológica superior a Boa e que os maiores problemas de contaminação se localizam na zona jusante do estuário

A Figura 2 apresenta a classificação microbiológica, resultante da aplicação das normas de qualidade, dos pontos monitorizados durante a época balnear de 2025.



Figura 2 – Classificação da qualidade microbiológica da água, para a época balnear 2025 (junho a setembro) e para cada ponto do estuário.

Estes resultados evidenciam a vulnerabilidade da área jusante do estuário, principalmente as áreas com menor hidrodinamismo, identificando-se como áreas sensíveis a contaminação, o braço sul, a marina de recreio e a Praia do Forte.

CONCLUSÃO

A aplicação do Decreto-Lei nº 135/2009 de 3 de junho alterado pelo Decreto-Lei nº 113/2012 de 23 de maio, mesmo em zonas não balneares tem permitido identificar as zonas mais sensíveis à poluição microbiológica do estuário do Rio Mondego. Esta abordagem possibilitou também a implementação de medidas de mitigação que se revelaram eficazes, destacando-se a melhoria do tratamento microbiológico da ETAR da Fontela, cuja classificação “Má”, em 2017, evoluiu para “Boa” ou “Excelente”, nos anos subsequentes.

Dada a importância socioeconómica da ilha da Morraceira (situada entre os dois braços do rio) para a região, o município da Figueira da Foz tem reforçado esforços no sentido da identificação das fontes de contaminação e implementação de medidas de mitigação.

Em suma, os resultados obtidos confirmam que a aplicação desta norma permite identificar áreas sensíveis em sistemas estuarinos e costeiros, sendo uma ferramenta importante para a gestão da qualidade da água nestes ecossistemas.

Palavras-Chave: Poluição Microbiológica, Qualidade da água, Gestão, Mitigação, Estuário Mondego.



XII CPGZC

POSTERS

EVOLUÇÃO DA POSIÇÃO DA LINHA DE COSTA ENTRE O CABEDELLO E A LEIROSA (FIGUEIRA DA FOZ) À ESCALA DE DÉCADAS

Paula FREIRE¹, Ana RILO¹, Filipa S. B. F. OLIVEIRA¹, Marta RODRIGUES¹, Alphonse NAHON¹,
Neide AREIA², Pedro COSTA², Leandro BARROS²

1. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pfreire@lnec.pt, arilo@lnec.pt, foliveira@lnec.pt, mfrdrigues@lnec.pt, anahon@lnec.pt

2. Universidade de Coimbra, areia.neide@gmail.com, ppcosta@dct.uc.pt, leandrobarros@ces.uc.pt

INTRODUÇÃO E OBJETIVO

O trecho costeiro entre a foz do rio Mondego e a Leirosa é caracterizado por um sistema de praia-duna arenoso e apresenta um histórico de recuo da linha de costa e de eventos de galgamento e inundação. Desde meados do século XX, diversas intervenções humanas modificaram as suas características morfológicas e a dinâmica sedimentar. Entre estas, destacam-se os molhes da foz do rio Mondego, as defesas costeiras longitudinais e esporões, colocação de geotêxteis para reforço do cordão dunar, várias intervenções relacionadas com a regularização portuária, como dragagens, e a alimentação artificial. Este estudo pretende analisar a evolução da posição da linha de costa nas últimas décadas, ao longo de cerca de 10 km entre o Cabedelo e a Leirosa. O trabalho enquadra-se no projeto iCOAST que visa contribuir para o aumento da resiliência das comunidades costeiras aos desafios causados pelo impacto das alterações climáticas, através da implementação de um Coastal Resilience Living Lab para o desenvolvimento de soluções inovadoras lideradas pela comunidade.

METODOLOGIA

A posição da linha de costa em 2010 e em 2023 foi digitalizada em ArcGIS Pro de ortofotos disponibilizados pela Direção Geral do Território (DGT) através do Serviço WMTS. Como indicador morfológico escolheu-se a base da duna frontal, e a análise da evolução da sua posição entre as diferentes datas foi efetuada de 100 em 100 m através da ferramenta DSAS v.6 (Himmelstoss *et al.*, 2024). Obteve-se a taxa de evolução da linha de costa, e considera-se a classificação apresentada por Luijendijk *et al.* (2018) para costas arenosas. A incerteza associada à taxa de evolução foi estimada segundo Fletcher *et al.* (2012) e Ponte Lira *et al.* (2016), considerando a incerteza da posição da linha de costa em cada data. Esta teve em conta a incerteza do processo de digitalização e da resolução da imagem. Não se considerou a incerteza associada à georreferenciação das imagens uma vez que estas estão georreferenciadas. A incerteza da taxa de evolução resulta da incerteza da posição da linha de costa em cada data e do tempo decorrido entre elas. No caso presente é de $\pm 0,3$ m/ano.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação da posição da linha de costa entre 2010 e 2023 mostra recuo generalizado de todo o setor (Figura 1), com o valor médio da taxa de evolução de $-1,6 \pm 0,3$ m/ano. Segundo a classificação de Luijendijk *et al.* (2018), este valor corresponde a um nível de erosão intensa. O recuo da linha de costa mais significativo ocorre numa extensão de cerca de 1500 m a sul do conjunto de esporões da Cova-Gala, onde o valor médio e o valor máximo de recuo é de $-4,9 \pm 0,3$ m/ano e $-6,7 \pm 0,3$ m/ano, respetivamente. Estes valores correspondem, segundo a classificação já referida, a níveis de erosão severa e extrema respetivamente. A zona onde a taxa de recuo atinge o valor máximo localiza-se a cerca de 1200 m a sul do 5º e último esporão da Cova-Gala e apresenta um historial de galgamento

da duna e de inundação. Estes resultados mostram que as intervenções de alimentação artificial submersa em frente à Cova-Gala efetuadas anualmente desde 2007, a colocação de geotexteis a sul do 5º esporão em 2018 e os reforços do cordão dunar efetuados em 2019 e 2021 na mesma zona (Coelho *et al.*, 2026) não foram suficientes para repor a posição da linha de costa de 2010. A tendência regressiva deste setor costeiro não se verificou apenas nas últimas décadas. Entre 1958 e 2010 os resultados de Ponte Lira *et al.* (2016), que recorreu ao mesmo indicador morfológico (base da duna), mostram já uma erosão intensa, cujo valor médio da taxa de evolução é de $-1,3 \pm 0,2$ m/ano. Nesse período, o maior recuo ocorreu nas zonas imediatamente a sul do esporão de Lavos (construído em 1979) e do 5º esporão da Cova-Gala (cujo conjunto de cinco esporões foram construídos entre 1978 e 1979), com valores máximos da taxa de recuo de $3,8 \pm 0,2$ m/ano e $2,2 \pm 0,2$ m/ano, respetivamente. Embora entre 1958 e 2010 tivesse ocorrido a construção das estruturas costeiras mais relevantes neste setor (molhes norte e sul da foz do rio Mondego em 1961-1965; defesas longitudinais da Cova-Gala em 1975; esporões de Cova-Gala em 1978-1979; esporão da Leirosa em 1978; esporão da Costa de Lavos em 1979), a comparação entre as taxas de evolução nos dois períodos mostra que em termos globais, a taxa média de recuo da linha de costa mantém-se na mesma ordem de grandeza. No entanto, entre 2010 e 2023 há o aumento significativo da taxa de recuo a sul do 5º esporão da Cova-Gala e um ligeiro aumento a sul do esporão da Leirosa (de $1,2 \pm 0,2$ m/ano em 1958-2010 e para $2,2 \pm 0,3$ m/ano em 2010-2023). Este agravamento poderá resultar do processo de reajuste da posição da linha de costa ao prolongamento do molhe norte da foz do rio Mondego, que ocorreu entre 2008 e 2010, e que originou o aumento da retenção de areia na praia da Figueira da Foz e do processo erosivo a sul. A sul do esporão de Lavos, a taxa de recuo diminui e ocorre uma ligeira progradação da linha de costa.

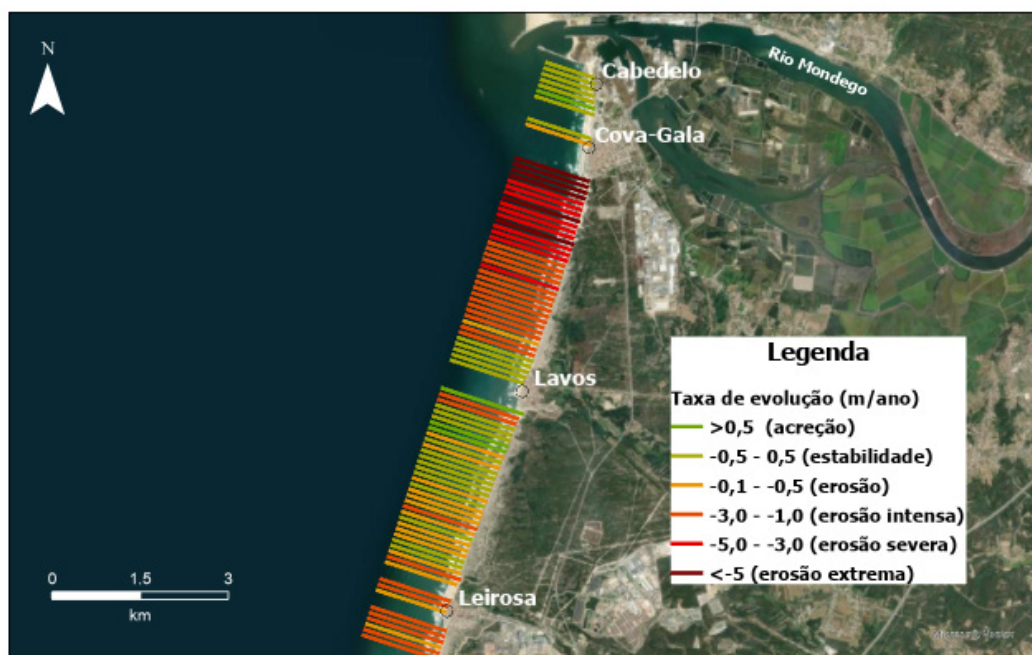


Figura 1 – Taxa anual de evolução da posição da linha de costa entre 2010 e 2023. Classificação das classes seg. Luijendijk *et al.* (2018). ESRI Basemap.

CONCLUSÕES

O setor costeiro analisado, entre o Cabedelo e a Leirosa, tem sido alvo de diversas intervenções estruturais portuárias e de proteção costeira nas últimas décadas, dando origem a alterações morfológicas com ajustes na posição da linha de costa. Os resultados mostram que desde 1958 a linha de costa apresenta neste setor tendência regressiva, que pontualmente se tem agravado nas últimas décadas. A zona com maior aumento da taxa de recuo situa-se a sul do 5º esporão da



Cova-Gala, com valores máximos de $6,7 \pm 0,3$ m/ano entre 2010 e 2023. A investigação em curso no âmbito do projeto iCOAST, que inclui a análise da evolução morfológica de alta resolução deste setor costeiro antes e após as intervenções do programa de alimentação artificial e reabilitação das dunas iniciado em julho de 2025 pela Agência Portuguesa do Ambiente, contribuirá para uma melhor compreensão da resposta morfológica do sistema a este tipo de soluções não estruturais. A análise da evolução da posição da linha de costa à escala de décadas contribui para o conhecimento das zonas de maior risco e como estas evoluem, e com informação relevante na elaboração de cenários futuros sobre o impacto das alterações climáticas, nomeadamente da subida do nível do mar, e no desenvolvimento de soluções de adaptação.

REFERÊNCIAS

- Coelho, C, Silva, P.A., Pinheiro, L.M., Lima, M., 2026, Dragagens – Sustentabilidade do Litoral. UA Editora – Universidade de Aveiro. doi: 10.48528/q2d0-zh09
- Fletcher, C.H., Romine, B.M., Genz, A.S., Barbee, M.M., Dyer, M., Anderson, T.R., Lim, S.C., Vitousek, S., Bochicchio, C., Richmond, B.M., 2012, National assessment of shoreline change: Historical shoreline change in the Hawaiian Islands. U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1051, 55 pp.
- Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Farris, A.S., Kratzmann, M.G., Bartlett, M.K., Ergul, A., McAndrews, J., Cibaj, R., Zichichi, J.L., and Thieler, E.R., 2024, Digital Shoreline Analysis System version 6.0: U.S. Geological Survey software release.
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R. *et al.*, 2018, The State of the World's Beaches. Sci Rep 8, 6641. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- Ponte Lira, C., Nobre Silva, A., Taborda, R., Freire de Andrade, C., 2016, Coastline evolution of Portuguese low-lying sandy coast in the last 50 years: An integrated approach. Earth System Science Data 8 (1): 265–78. doi: 10.5194/essd-8-265-2016.

AGRADECIMENTOS

O Projeto iCOAST é financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e por Fundos Nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT).

Palavras-Chave: evolução da linha de costa; gestão costeira; laboratório vivo; dinâmica sedimentar; projeto iCOAST



MODELLING MANGROVE COASTAL PROTECTION UNDER SEA-LEVEL RISE IN THE MACUSE ESTUARY

Nélio SITO^{1,2}, José PINHO³

1. Universidade Eduardo Mondlane, Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras, Quelimane, Moçambique; nelio.sitoe@uem.mz

2. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal; id12286@alunos.uminho.pt

3. Universidade do Minho, Centro de Território, Ambiente e Construção, Departamento de Engenharia Civil; jpinho@civil.uminho.pt

Palavras-Chave: nature-based solutions; mangrove modelling; hydro-morphodynamics; Macuse estuary; digital twin; climate change adaptation.

INTRODUCTION

Coastal communities in Mozambique face escalating flood threats from sea-level rise and intensifying tropical cyclones. The Macuse estuary in Zambézia Province is a tide-dominated system with extensive mudflats and fringing mangrove forests that has suffered significant shoreline erosion and degradation. This PhD project develops a digital twin of the Macuse estuary to study nature-based coastal protection strategies, coupling the Delft3D Flexible Mesh (Delft3D-FM) hydrodynamic model with the individual-based mangrove growth model mesoFON. The research addresses critical knowledge gaps in mangrove eco-morphodynamic modelling for African estuaries and builds towards an AI-enhanced decision support tool for coastal managers.

YEAR 1 ACTIVITIES

State-of-the-Art Review

A comprehensive review of nature-based coastal protection and mangrove eco-morphodynamic modelling was completed. Mangrove forests can reduce storm-induced flood extents by up to one-third, and mangrove drag with root stabilisation significantly alters intertidal sedimentation. The DFM-FON coupled framework (Beselly *et al.*, 2023) linking Delft3D-FM with the mesoFON individual-based model, was identified as the foundation for Year 2 model development. Critical gaps remain: no advanced coupled model has been applied in African estuaries, and wave-vegetation interactions are not yet fully integrated in existing frameworks (Van Hespen *et al.*, 2023).

Hydrodynamic Model Setup

A D-Flow FM model of the Macuse estuary was constructed on an unstructured grid with 12 sigma layers. Forcing includes tidal boundary conditions at the ocean boundary, fluvial inflow at the upstream boundary, and ERA5 reanalysis wind fields. The simulation covered at first 1 month, with outputs at two observation stations – Point 07 (upper channel) and Point 18 (estuary mouth).

PRELIMINARY RESULTS AND DISCUSSION

Tidal Dynamics

The model reproduces the mixed semi-diurnal tidal regime of the Macuse estuary. At the mouth (Point 18), spring tidal range reaches approximately 4.2 m, while neap range is around 1.4 m. At the upper channel station (Point 07), amplitudes are slightly attenuated. The phase lag between stations



is approximately 1.5 hours during spring tides and less than 30 minutes during neap tides, consistent with tidal propagation dynamics expected in a shallow tide-dominated estuary. This spring-neap modulation is clearly visible in both tidal elevation and current velocity time series.

CURRENTS AND VERTICAL STRUCTURE

Peak tidal current speeds at Point 18 reach 0.5 m/s during spring tide versus ~0.25 m/s at Point 07. Vertical profiles reveal a well-mixed to weakly stratified water column. Salinity ranges from 26-34 psu at Point 18 and 16-26 psu at Point 07, reflecting upstream freshwater influence. Wind speeds averaged 3-6 m/s throughout the period with limited effect on estuarine circulation relative to tidal forcing. These results provide a robust hydrodynamic baseline for the forthcoming sediment transport and mangrove coupling phases.

NEXT STEPS

Year 2 will: (i) incorporate sediment transport into the Delft3D-FM model; (ii) couple the hydrodynamic model with mesoFON for two-way mangrove dynamics; and (iii) calibrate the coupled model against field data from the Macuse estuary. Field campaigns planned for 2026 will gather baseline data on mangrove distribution, canopy cover, and intertidal morphology using RTK-GPS surveys and UAV photogrammetry.

REFERENCES

- Beselly, S. M. *et al.* (2023). Modelling mangrove-mudflat dynamics with a coupled individual-based-hydro-morphodynamic model. *Environmental Modelling & Software*, 169, 105814.
- Van Hespen, R. *et al.* (2023). Mangrove forests as a nature-based solution for coastal flood protection. *Water Science and Engineering*, 16(1), 1–13.



AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE AO GALGAMENTO DAS DUNAS NAS GARGANTAS NORTE E SUL DA PENINSULA DE MACANETA

André António JOSÉ¹, Nélcio N.O SITÓE^{1,2,3}, Fialho. P. J. NEHAMA¹, Noca B. FURACA¹, José PINHO³

1. Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras, Universidade Eduardo Mondlane, Quelimane, Moçambique.

2. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal.

3. Universidade do Minho, Centro de Território, Ambiente e Construção, Departamento de Engenharia Civil

Email: andrewbanze5@gmail.com, nelio.sitoe@uem.mz, fialho.nehama@uem.ac.mz, nocafulaca@gmail.com, jpinho@civil.uminho.pt

RESUMO

A região costeira de Maputo, incluindo as dunas da península de Macaneta, que constitui uma barreira natural de proteção do baixo estuário do rio Incomati, contra a energia das ondas e a dinâmica intensa do oceano, tem sofrido níveis elevados de erosão (Mabau, 2021). Tal erosão tem contribuído para a redução da altura e largura das dunas nas gargantas norte e sul e no aumento da susceptibilidade ao galgamento, no qual ocorre quando o nível ultrapassa a crista das dunas devido ao espraçamento das ondas (Karisson & Liljedahl, 2015; Ciavola, 2017). Esses processos, impulsionam o célere rompimento permanente da península de macaneta, formando um caminho mais curto do rio. A avaliação da susceptibilidade ao galgamento das gargantas a partir de um levantamento topográfico de alta resolução, oferece vantagens pela capacidade de poder mapear as dunas e analisar a sua capacidade de resistir ao avanço das ondas. Portanto, o estudo contribui com medidas eficazes de gestão de riscos costeiros contra a ação das ondas, protecção das infraestruturas turísticas sobre as dunas e a protecção dos serviços ecossistémicos de que a comunidade local é beneficiada (Allport, 2021). Para este estudo foram realizados levantamentos fotogramétricos com o drone DJI MAVIC para a obtenção de ortofotos e MDT, combinada com dados oceanográficos (altura e energia das ondas, marés e correntes) onde foi calculado o espraçamento das ondas combinada com os cenários projectados de elevação do nível do mar do relatório do IPCC (SSP2 2050 e SSP5 2100) para avaliar o galgamento das dunas nas gargantas da península. Os cenários de galgamento nas gargantas norte e sul foram efectuadas com base nos dados medidos in situ em 2023 que representa a situação atual e a combinação dos valores de aumento de nível do mar representantes do cenário otimista (SSP2 2050) e pessimista (SSP5 2100). Embora a garganta norte possua maior elevação do que a garganta sul, o espraçamento calculado no cenário atual coincide com a mínima cota das dunas (5.6m) dessa garganta. De acordo com a comparação das duas gargantas, observa-se que o rompimento permanente está mais susceptível a garganta norte mesmo com uma declividade média de (0.15). Este estudo demonstra que a integração do modelo digital de elevação gerado pelo drone de alta resolução e o espraçamento, permite avaliar a susceptibilidade ao galgamento nas gargantas da península, servindo de apoio essencial para a gestão de riscos e protecção de infraestruturas e serviços ecossistémicos.

Palavras-Chave: Península de Macaneta, Galgamento das dunas, Drones, Stockdon.

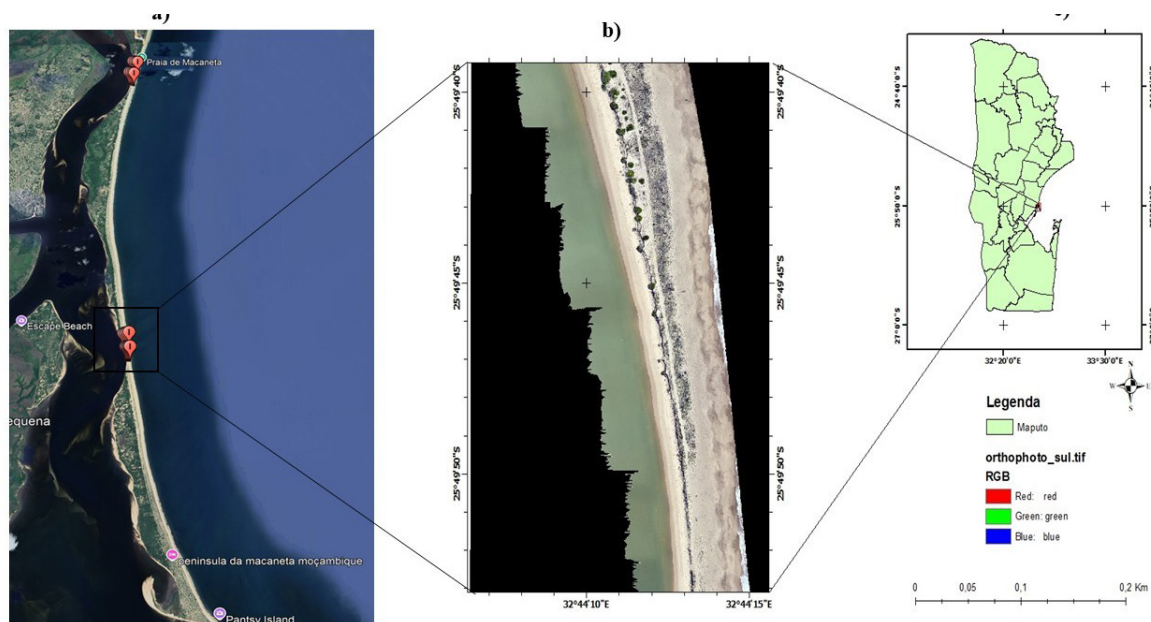


Figura 1: Mapa geral da localização da área de estudo: a) representa a península de macaneta e os pontos de colecta nas duas gargantas; b) ilustração da ortofoto sul; c) mapa geral da província de Maputo.

REFERÊNCIAS

- Allport, G. (2021). Birds and birding 2013-2020 at Macaneta, Southern Mozambique. Obtido de <https://doi.org/10.15641/abb.vli.1066>
- Ciavola, P. (2017). Coastal Storms: Process and impacts (1 ed.). John Wiley & Sons Ltd.
- Karisson, C., & Liljedahl, J. (2015). Coastal evolution at Macaneta Spit, Mozambique. . Lund University, Building and Environmental Technology, Sweden .
- Mabau, M. E. (2021). Análise do papel da Educação Ambiental na conservação das dunas costeiras na Localidade Macaneta-Marracuene. Monografia , Universidade Eduardo Mondlane , Departamento de Educação em Ciências Naturais e Matemática , Macaneta.
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., & Sallenger, R. H. (2006). Empirical parametrization of setup, swash, and runup. Coastal engineering, 7(53), 573-588.



ATUALIZAÇÃO DA ANÁLISE DA EVOLUÇÃO TOPO-BATIMÉTRICA DA COVAGALA COM OS LEVANTAMENTOS COSMO DE 2025

Filipa S. B. F. OLIVEIRA¹, Paula FREIRE¹, Marta RODRIGUES¹, Ana RILO¹, Alphonse NAHON¹,
Neide AREIA², Pedro COSTA², José L. BARROS²

1. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, foliveira@lnec.pt, pfreire@lnec.pt, mfrdrigues@lnec.pt, , arilo@lnec.pt, anahon@lnec.pt

2. Universidade de Coimbra, areia.neide@gmail.com, ppcosta@dct.uc.pt, leandrobarros@ces.uc.pt

INTRODUÇÃO E OBJETIVO

O estudo, integrado no projeto iCOAST, teve como objetivo atualizar o conhecimento sobre a evolução topo-batimétrica do trecho costeiro da CovaGala, a sul da Figueira da Foz, entre jul/2021–ago/2025. Assim, dá-se continuidade a três estudos prévios, nos quais se efetuou a análise nos períodos sequenciais: 1975-2011 (Oliveira e Brito, 2015), 2011-2019 (Oliveira *et al.*, 2021) e 2019-2021 (Oliveira *et al.*, 2022). Entre jul-out/2025 (120 dias) a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) executou um projeto de alimentação artificial entre a Cova-Gala e Lavos que envolveu um total de ~3.3 milhões de m³ de sedimentos dragados da zona frontal à praia da Figueira da Foz.

DADOS E METODOLOGIA

Utilizaram-se dois levantamentos topo-batimétricos (de jul/2021 e de 11/jul/2025) e três topográficos (de 14/março/2025, de 22/ago/2025 e de 29/ago/2025) do programa COSMO da APA. A análise da evolução tridimensional entre datas dos levantamentos baseou-se na seguinte metodologia: i) elaboração de um modelo digital de terreno (MDT) para cada levantamento, através de software de mapeamento de superfícies; ii) definição da máxima área comum entre MDTs a comparar; ii) cálculo da diferença de elevação entre os MDTs; iii) mapeamento da erosão/acumulação com recurso a escalões da diferença de elevação e quantificação das respetivas áreas e volumes associados.

Efetuaram-se seis comparações com os cinco levantamentos topo-batimétricos e topográficos (esquema da Figura 1). A área comum aos dois levantamentos topo-batimétricos (Figura 2.a) abrange o trecho com ~6.7 km de linha de costa localizado imediatamente a sul do molhe sul, entre as elevações -10 e +10 m relativas ao Zero Hidrográfico. O levantamento topográfico de março/2025 (próximo do final do inverno marítimo) abrange a mesma extensão longitudinal dos dois levantamentos topo-batimétricos e foi comparado com ambos (comparações b) e c) da Figura 2). Os dois levantamentos topográficos de ago/2025 abrangeram apenas a zona emersa entre os três esporões mais a sul da Cova-Gala (comparações d), e) e f) da Figura 2).

RESULTADOS PRINCIPAIS

Na totalidade da zona topo-batimétrica comparada, entre jul/2021 e 11/jul/2025 (4 anos), deu-se um saldo de assoreamento (A) superior a 2x10⁶ m³ de areia (Figura 1). A erosão (E) que se observa está predominantemente associada a um sistema barra-fossa submerso localizado entre o esporão mais a sul da Cova-Gala e o esporão da Costa de Lavos, e a uma possível célula de circulação induzida pelo molhe sul localizada em frente à Cova-Gala (Figura 2.a).

O saldo sedimentar observado na totalidade da praia emersa entre jul/2021 e março/2025 corresponde a E superior a 0.5x10⁶ m³ de areia (Figura 1). No entanto, entre março/2025 e jul/2025

o saldo sedimentar passou a $A=191 \times 10^3 \text{ m}^3$, o que demonstra o elevado impacto da sazonalidade do transporte sedimentar na morfologia (comparações b) e c) da Figura 2).

As comparações dos três levantamentos do verão de 2025 mostram que entre 11/jul e 22/ago ocorreu $A=136 \times 10^3 \text{ m}^3$ na zona emersa entre esporões (Figuras 1 e 2.d) e que no período de 7 dias entre 22 e 29/ago ocorreu $E=23 \times 10^3 \text{ m}^3$ na mesma zona (Figura 1 e 2.f). O fenómeno de assoreamento verificado no 1º período deve-se à alimentação artificial em curso no local. O fenómeno de erosão verificado no 2º período deve-se ao ciclone pós-tropical Erin, ocorrido entre 23-27/ago, com ondas de H_s superior a 8 m. Note-se que, a comparação entre 11/jul e 29/ago (Figura 1 e Figura 2.e) mostra que a perda de volume sedimentar da praia ocorrida durante este evento erosivo foi inferior ao aumento do volume sedimentar devido à operação de alimentação artificial iniciada em jul/2025.

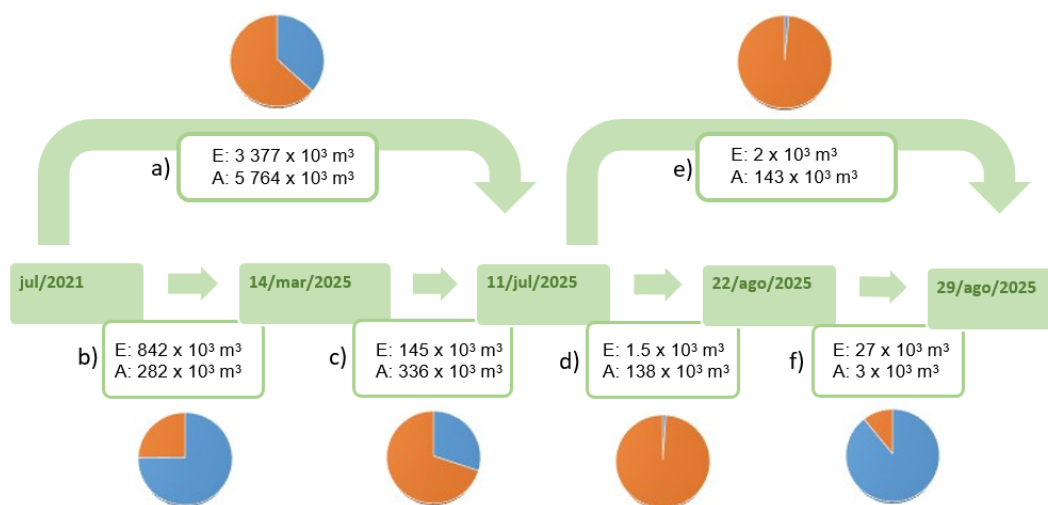


Figura 1 – Volume de erosão (E) e assoreamento (A) para cada uma das seis comparações entre os cinco levantamentos COSMO (designação das comparações, a-f, em concordância com designação na Figura 2).

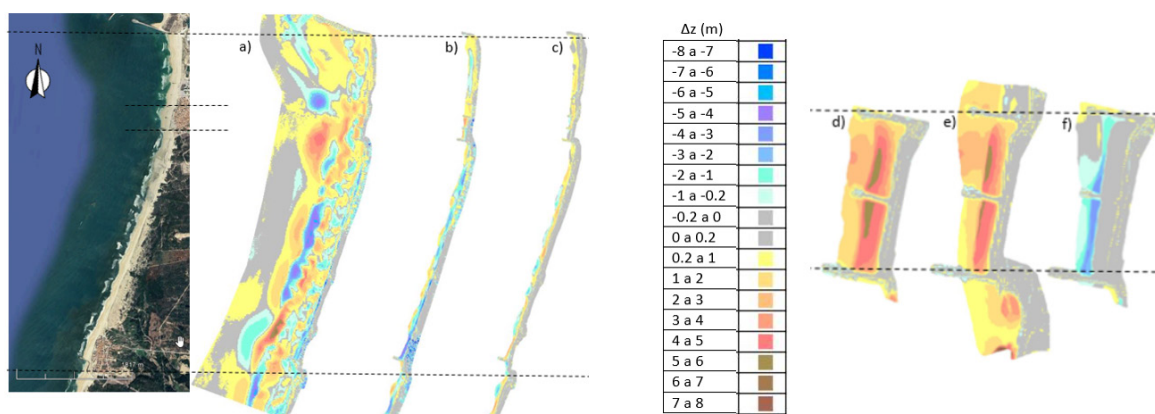


Figura 2 - Comparações entre os levantamentos topo-batimétricos e topográficos do programa COSMO: a) jul/2021-11/jul/2025; b) jul/2021-14/março/2025; c) 14/março/2025-11/jul/2025; d) 11/jul/2025-22/ago/2025; e) 11/jul/2025-29/ago/2025; e f) 22/ago/2025-29/ago/2025.

CONCLUSÕES

As duas células mais a sul do campo de esporões da Cova-Gala (que nos estudos anteriores demonstraram insuficiente recuperação do volume sedimentar perdido durante os períodos mais energéticos) beneficiaram diretamente das operações de alimentação artificial iniciadas em jul/2025. Nestas células, o volume de areia mobilizado e transportado em direção ao mar sob ação



da forte agitação marítima que ocorreu durante a tempestade Erin foi cerca de 17% do aumento de volume emerso conferido pela alimentação artificial. Entre jul/2021 e jul/2025 o trecho entre a Cova-Gala e a Costa de Lavos continuou a beneficiar globalmente da deposição de dragados que se iniciou em 2007 e tem sido efetuada anualmente com variadas intensidades (Oliveira *et al.*, 2021), ainda que inferiores ao grande reforço efetuado em jul-out/2025.

REFERÊNCIAS

Oliveira, F.S.B.F. e Brito, F.A., 2015, Evolução da morfologia costeira a sul da embocadura do rio Mondego, de 1975 a 2011. Livros de Resumos do VIII CPGZCPEP, Univ. de Aveiro, Portugal, CD-ROM, 15 pp.

Oliveira, F.S.B.F., Oliveira, J.N.C., Freire, P.M.S., 2021, Evolução da morfologia costeira a sul da embocadura do rio Mondego, de 2011 a 2019. Livro de Resumos do X CPGZCPEP, Univ. do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, pp 358-360.

Oliveira, F.S.B.F., Oliveira, J.N.C., Freire, P.M.S., Fortunato, A.B., Nahon, A., 2022, Morphological evolution of Cova-Gala: update with the COSMO 2020 and 2021 topo-bathymetry. Livro de Resumos da 6ª Conf. MEC, LNEC, Lisboa, pp 75-76.

AGRADECIMENTOS

Colaboração do técnico Fernando Brito do LNEC. O Projeto iCOAST é financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e por Fundos Nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT).

Palavras-Chave: dinâmica sedimentar; morfologia costeira; erosão; alimentação artificial; projeto iCOAST.



MAPEAMENTO SEMIAUTOMÁTICO DE TSS COM IMAGENS SENTINEL-2 APLICADO A ESTUDOS COSTEIROS

Pedro GONÇALVES¹, Sílvia NAVE²

1. LNEG, Rua da Amieira. Apartado 1089. 4466-901 S. Mamede de Infesta, pedro.goncalves@lneg.pt

2. LNEG, Estrada da Portela. Bairro do Zambujal. Apartado 7586, Alfragide. 2610-999 Amadora, silvia.nave@lneg.pt

1. INTRODUÇÃO

A monitorização da qualidade da água em ambientes aquáticos complexos exige algoritmos robustos, fluxos de processamento eficientes e dados com elevada resolução espacial e temporal. Em zonas de transição terra-mar, como estuários, baías ou na foz de um rio, os processos hidrodinâmicos e sedimentares são altamente dinâmicos, originando variações espaciais abruptas da qualidade da água à escala de dezenas de metros, o que torna essencial o recurso a sensores remotos de média a alta resolução.

O instrumento multiespectral (MSI) da missão Sentinel-2, a bordo dos satélites Sentinel-2A e Sentinel-2B, apresenta características particularmente adequadas para a monitorização de águas interiores e costeiras. Com 13 bandas espectrais, resolução espacial até 10 m e um ciclo de revisita de aproximadamente cinco dias ao Equador, o Sentinel-2 permite observar fenómenos costeiros de pequena escala com frequência suficiente para acompanhar eventos hidrossedimentares relevantes, como plumas de sedimentos associadas a descargas fluviais.

Neste contexto, apresenta-se um pipeline automatizado, desenvolvido em Python, para o processamento sistemático de imagens Sentinel-2 L1C e a estimativa da concentração de Sólidos Suspensos Totais (TSS). O fluxo de trabalho integra a correção atmosférica com o processador C2RCC e o algoritmo adaptativo de Jiang *et al.* (2023). O método é aplicado a águas costeiras na foz do rio Douro, um ambiente de elevada dinâmica hidrossedimentar. São apresentados mapas de TSS de alta resolução espacial que permitem visualizar e quantificar a extensão da pluma sedimentar fluvial em diferentes datas. Por fim, discute-se a aplicabilidade deste fluxo de trabalho à monitorização da qualidade da água e ao apoio à gestão do litoral.

2. METODOLOGIA

O processamento das imagens Sentinel-2 foi automatizado através de um motor de processamento que integra o SNAP, o Graph Processing Tool (GPT), desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (ESA). A correção atmosférica das imagens foi realizada com recurso ao processador C2RCC (Case-2 Regional CoastColour), especificamente concebido para águas costeiras e interiores opticamente complexas. Este processo incorpora dados meteorológicos auxiliares do ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), nomeadamente o ozono total, o vapor de água e a pressão ao nível médio do mar, permitindo melhorar a caracterização das condições atmosféricas no momento da aquisição das imagens.

A estimativa das concentrações de TSS baseia-se na metodologia adaptativa proposta por Jiang *et al.* (2023), que classifica os corpos de água em quatro classes de turbidez e seleciona dinamicamente as bandas espectrais de referência no intervalo 560–865 nm, reduzindo as incertezas associadas a abordagens baseadas em bandas fixas, particularmente relevantes em ambientes costeiros com fortes gradientes de concentração.



O pipeline desenvolvido inclui ainda rotinas para gestão automática de dados, controlo de qualidade, geração de produtos cartográficos e cálculo de índices derivados, assegurando a reprodutibilidade e a escalabilidade do processo.

3. RESULTADOS

A metodologia para a classificação de turbidez e cálculo de TSS, desenvolvida por Jiang *et al.* (2023) e validada no estuário do rio Tejo, foi, neste trabalho, aplicada a águas costeiras na foz do rio Douro. Esta área apresenta forte variabilidade hidrossedimentar e tem um papel importante no fornecimento de sedimentos ao sistema da deriva litoral. Para avaliar a aplicabilidade e a escalabilidade do pipeline, realizou-se um ensaio com 15 imagens Sentinel-2 MSI, processadas automaticamente através da ferramenta desenvolvida. Deste processamento resultaram mapas de TSS com 10 m de resolução espacial. As concentrações estimadas variaram entre valores próximos de 0 g/m³, em águas costeiras pouco túrbidas, e cerca de 89 g/m³ no núcleo da pluma fluvial.

Em quatro momentos representativos (Figura 1), os mapas evidenciam a extensão e a variabilidade da pluma sedimentar gerada pela descarga do Douro. Os resultados mostram que as imagens MSI permitem monitorizar a pluma com elevado detalhe espacial (à escala de dezenas de metros), mantendo simultaneamente uma visão integrada da sua extensão total, que pode atingir dezenas de quilómetros. Os padrões de dispersão observados são coerentes com o papel do Douro enquanto fonte relevante de sedimentos para a deriva litoral e para o balanço sedimentar costeiro.

Para além da estimativa de TSS, o pipeline gera 12 índices espectrais e, opcionalmente, mais de 20 produtos de qualidade da água, incluindo o Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI), o Maximum Chlorophyll Index (MCI) e o Índice de Estado Trófico (TSI). Estes produtos permitem relacionar os processos sedimentares com as condições tróficas e bio-ópticas do meio aquático.

4. CONCLUSÕES

O ensaio realizado na foz do rio Douro demonstrou a capacidade do pipeline para estimar e cartografar a concentração de TSS, de forma automática e reprodutível, obtendo valores compreendidos entre cerca de 0 e 89 g/m³. Os resultados confirmam a eficácia e a escalabilidade da abordagem metodológica adotada, que integra deteção remota e automação, evidenciando a sua adequação para a monitorização da qualidade da água em ambientes costeiros dinâmicos.

Com base nestes resultados, está em curso o processamento de mais de 700 imagens Sentinel-2 bem como uma análise multitemporal das concentrações de TSS. Pretende-se estabelecer relações entre a dinâmica da pluma sedimentar do Douro, o caudal de descarga e a precipitação na bacia hidrográfica, com o objetivo de compreender melhor os fatores que controlam o transporte sedimentar fluvial. Adicionalmente, tentar-se-á caracterizar de forma robusta a extensão, geometria e padrões de dispersão da pluma, bem como a sua variabilidade temporal, e resposta a eventos extremos. Esta abordagem permitirá identificar regimes dominantes de dispersão e contribuir para a delimitação da interface rio-oceano, onde se concentram os processos de mistura e transporte sedimentar para o offshore. Esta abordagem constitui uma ferramenta útil para o estudo da dinâmica sedimentar costeira e para o apoio à gestão integrada do litoral.

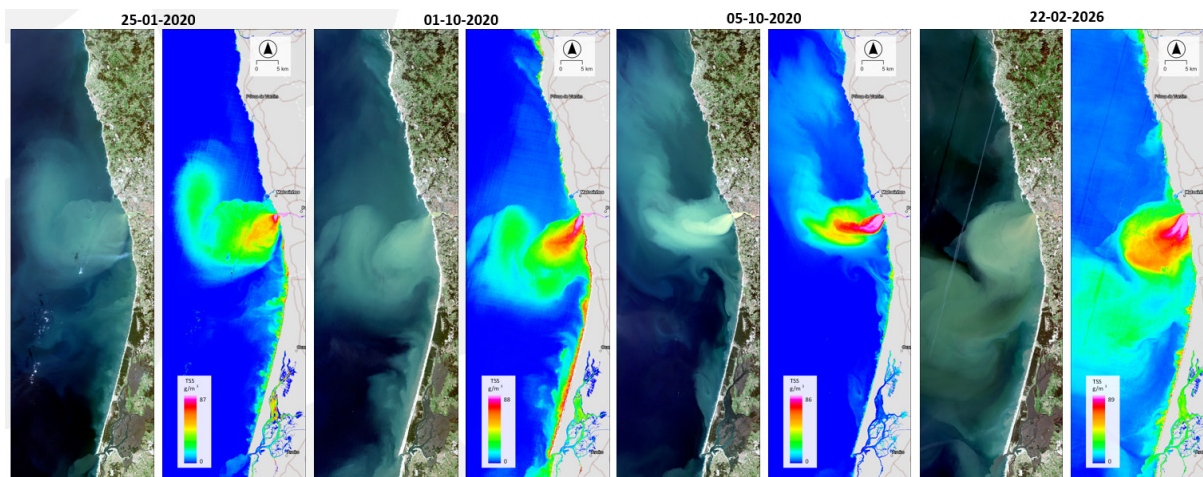


Figura 1: Imagens Sentinel-2A e mapas correspondentes da concentração de sólidos suspensos totais (TSS; g/m^3) em quatro momentos temporais, permitindo a visualização e a quantificação da extensão da pluma gerada pela descarga do rio Douro.

Palavras-Chave: TSS; Sentinel-2; Mapeamento Automático; Descarga fluvial; Rio Douro

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dalin Jiang, Bunkei Matsushita, Nima Pahlevan, Daniela Gurlin, Cédric G. Fichot, Joshua Harringmeyer, Giulia Sent, Ana C. Brito, Vanda Brotas, Mortimer Werther, Veloisa Mascarenhas, Matthew Blake, Peter Hunter, Andrew Tyler, Evangelos Spyarakos. Estimating the concentration of total suspended solids in inland and coastal waters from Sentinel-2 MSI: A semi-analytical approach, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 204, 2023, Pages 362-377. ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.09.020>.



DÉFICE SEDIMENTAR E EROSÃO COSTEIRA EM PORTUGAL: ENQUADRAMENTO E DESAFIOS DE GESTÃO

Sílvia NAVE¹, Pedro GONÇALVES²

1. LNEG, Estrada da Portela. Bairro do Zambujal. Apartado 7586, Alfragide. 2610-999 Amadora, silvia.nave@lneg.pt

2. LNEG, Rua da Amieira. Apartado 1089. 4466-901 S. Mamede de Infesta, pedro.goncalves@lneg.pt

1. INTRODUÇÃO

A zona costeira continental portuguesa tem uma enorme importância estratégica social, económica e ambiental, concentrando cerca de três quartos da população e 85% do PIB¹. A elevada urbanização, associada à intensificação dos efeitos das alterações climáticas, torna estes territórios particularmente vulneráveis, sendo estimado que cerca de metade do litoral arenoso apresente tendência erosiva². Esta realidade configura um problema relevante de governação territorial e de planeamento costeiro, exigindo abordagens integradas que articulem conhecimento científico, avaliação económica, enquadramento institucional e literacia social na tomada de decisão.

Nas últimas décadas, as medidas de mitigação da erosão costeira em Portugal têm evoluído no sentido da substituição progressiva de estruturas rígidas por soluções de engenharia suave, como a alimentação artificial de praias³. Embora relevantes para a proteção de troços costeiros vulneráveis, estas intervenções apresentam custos elevados e eficácia temporal limitada. Torna-se, por isso, essencial questionar a sua sustentabilidade a longo prazo e integrar soluções estruturais que atuem nas causas do problema, em sintonia com princípios de eficiência económica, resiliência e solidariedade intergeracional.

Neste contexto, subsistem limitações no conhecimento holístico do balanço sedimentar e na avaliação integrada dos custos e benefícios económicos, sociais e ambientais a longo prazo. O presente resumo destaca a importância de explorar soluções estruturais, que atuem nas causas do problema, enquanto alicerce de uma gestão costeira mais inteligente e sustentável. Propõe-se a integração da literacia sedimentar como componente central dessa abordagem, salientando a importância de instrumentos de comunicação capazes de tornar explícitos os custos acumulados das respostas exclusivamente reativas, bem como os benefícios sistémicos das estratégias que restabelecem, total ou parcialmente, a continuidade sedimentar entre a bacia hidrográfica e o meio marinho.

2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE FATORES DETERMINANTES

2.1 Déficit sedimentar fluvial

A estabilidade dos sistemas costeiros arenosos depende do equilíbrio do balanço sedimentar e da continuidade do fluxo sedimentar desde as bacias hidrográficas até ao mar. Embora a erosão costeira tenha resultado de múltiplas pressões antrópicas, como a construção de infraestruturas costeiras, a extração de inertes e o uso do solo⁴, a redução do aporte sedimentar fluvial à deriva litoral é amplamente reconhecida como um fator determinante para o déficit sedimentar, em particular na região norte.

Desde meados do século XX, a construção de barragens para aproveitamento hidroelétrico e regularização de caudais tem condicionado o transporte sedimentar fluvial, reduzindo a descarga de sedimentos na costa norte^{4,7-10}. Antes da sua construção, cerca de 90% do aporte sedimentar à costa norte portuguesa, estimado em aproximadamente 2×10^6 m³/ano, tinha origem no rio Douro, atualmente, estima-se que esse valor se situe em cerca de 2×10^5 m³/ano^{5,6,17}. Esta realidade



evidencia desafios na articulação das políticas da água, energia e ordenamento do território, bem como lacunas na literacia social sobre os custos públicos das soluções para o défice sedimentar.

2.2 Alimentação artificial de praias: desempenho, condicionantes e limites de sustentabilidade

A alimentação artificial de praias constitui uma medida de mitigação enquadrada nas políticas nacionais de adaptação costeira³, sendo aplicada em Portugal, maioritariamente de forma reativa, com o objetivo de repor a largura de praia, melhorar as condições de estabilidade da linha de costa, reduzir o risco de galgamento e proteger áreas urbanas e infraestruturas¹¹.

A durabilidade destas intervenções, que varia geralmente entre 3 e 10 anos⁴, 12-14, depende de fatores como a disponibilidade de sedimentos, compatibilidade granulométrica e dinâmica da deriva litoral. No entanto, os elevados custos associados e a necessidade de reposições recorrentes evidenciam os limites de uma estratégia centrada na mitigação local e reativa^{3,11,13-15}, sem resolução do défice sedimentar a montante. Estas soluções tendem a reforçar uma perceção de proteção imediata, frequentemente dissociada da consideração dos custos de longo prazo e da permanência de riscos residuais. A ausência de comunicação clara sobre estes limites pode comprometer a compreensão pública do problema e dificultar o reconhecimento social da necessidade de soluções estruturais alternativas.

2.3 Alterações climáticas, eventos extremos e risco costeiro

A elevação do nível médio do mar e a maior frequência e intensidade de tempestades intensificam os processos erosivos e aumentam a incerteza associada ao planeamento costeiro. Em alguns contextos, eventos extremos podem provocar perdas sedimentares de grande magnitude, comprometendo significativamente a durabilidade funcional das alimentações artificiais de praias¹⁴⁻¹⁶. Em Portugal, as sucessivas tempestades ocorridas em janeiro de 2026 ilustram bem esta vulnerabilidade, com recuo da linha de costa da ordem de 20 m no setor costeiro da Praia de Maceda, Ovar. Em cenários de maior frequência e intensificação de eventos extremos, o intervalo entre intervenções tenderá a encurtar, aumentando os custos de ciclo de vida destas soluções predominantemente reativas. Entre 1995 e 2014, foram investidos cerca de 200 M€ na proteção do litoral em Portugal (≈ 10 M€/ano). De acordo com o Grupo de Trabalho do Litoral¹⁷, os custos previstos no Plano de Ação de Valorização e Proteção do Litoral para o período 2015–2050 poderão atingir aproximadamente 1101 M€ (≈ 30 M€/ano), reforçando a necessidade de privilegiar soluções estruturais e preventivas.

3. IMPORTÂNCIA DE EXPLORAR ABORDAGENS SUSTENTÁVEIS DE LONGO PRAZO

O diagnóstico consolidado da erosão costeira em Portugal evidencia a necessidade de políticas que atuem sobre as causas estruturais do défice sedimentar, promovendo soluções economicamente eficientes, tecnicamente robustas e socialmente informadas. Em Portugal, são escassos os estudos sobre os custos de soluções sustentáveis a longo prazo²¹. Apesar dos avanços na avaliação da erosão dos solos à escala europeia, continuam a existir fortes limitações de dados sobre assoreamento e gestão de sedimentos em albufeiras²². De acordo com uma primeira estimativa, a remoção de cerca de 135 milhões de m³ de sedimentos acumulados resultantes da erosão hídrica na União Europeia implica custos da ordem de 2,3 ($\pm 0,9$) mil milhões de euros por ano. Os resultados evidenciam diferenças substanciais entre países e entre albufeiras no interior de um mesmo país, associadas não só aos custos locais, mas também aos métodos de remoção de sedimentos e às características das albufeiras. Em Portugal, a remoção de 3,86 milhões de m³ de sedimentos, considerando um custo de 6 €/m³, implicaria um encargo da ordem dos 23,2 M€²², contudo, serão necessários estudos adicionais que permitam aprofundar o conhecimento sobre estas soluções e os respetivos custos.



Ao reduzir a dependência de intervenções reativas no litoral, estas abordagens poderão promover uma adaptação costeira mais resiliente, reduzir os custos públicos a longo prazo e reforçar a coerência entre as políticas da água, da energia e do ordenamento do território¹⁸⁻²⁰.

4. CONCLUSÕES

É consensual, entre a comunidade científica, o reconhecimento do défice sedimentar fluvial como fator crítico da erosão costeira. Embora a alimentação artificial de praias continue a ser fundamental na mitigação de curto prazo em áreas críticas, a sua sustentabilidade económica e social é limitada pela recorrência das intervenções e pela elevada vulnerabilidade a eventos extremos, como evidenciaram as tempestades de janeiro de 2026. A comparação sistemática entre custos acumulados de soluções reativas e benefícios de soluções estruturais permanece pouco integrada nos processos de decisão.

Neste contexto, uma visão holística da gestão sedimentar, baseada em estudos técnico-científicos e suportada por literacia técnica e económica, é fundamental para tornar explícitos os custos acumulados das soluções reativas e comunicar os benefícios sistémicos das estratégias que restabelecem a continuidade sedimentar entre a bacia hidrográfica e o meio marinho, reforçando a resiliência territorial e apoiando decisões públicas mais informadas, equitativas e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

1. Andrade, C. *et al.* (2002). Zonas costeiras. In F. D. Santos *et al.* (Eds.), *Climate change in Portugal: scenarios, impacts and adaptation measures* (SIAM Project) (pp. 173–219). Lisboa: Gradiva
2. APA – Relatório do Estado do Ambiente (<https://rea.apambiente.pt/content/linha-de-costa-em-situacao-de-erosao>)
3. Pinto, C. A., *et al.*, (2020). Estratégias de gestão da erosão costeira em Portugal: passado, presente e desafios futuros. In Conferência ADAPT-ES. APA.
4. Veloso-Gomes, F., *et al* (2006). *Erosão costeira em Portugal*. Porto: FEUP.
5. Plano Nacional da Água, 2001;
6. Santos, R., *et al.* (2014). Sediment yield reduction in regulated rivers: The Douro case. *Geomorphology*, 228, 549–561.
7. Abecassis, F. (1997). *Portos e erosão costeira*. Lisboa: Instituto Nacional de Investigação das Pescas.
8. Portela, M. (2007). *Barragens e transporte sólido fluvial em Portugal*. Lisboa: LNEC;
9. Valle, J. (2014). *Retenção sedimentar em barragens e implicações costeiras*. Lisboa;
10. Santos-Ferreira, A., & Santos, F. D. (2014). Alterações hidrológicas e impactes no transporte sedimentar. In *Alterações Climáticas em Portugal* (SIAM II). Lisboa: Gradiva
11. Pinto, C. A., & Teixeira, S. B. (2018). *Alimentação artificial de praias na faixa costeira de Portugal continental*. APA.
12. Martins, H., & Veloso-Gomes, F. (2011). Alimentação artificial de praias em ambientes energéticos intermédios. In *6as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente*. Porto: FEUP
13. Teixeira, S. B. (2011). *Gestão da erosão costeira no Algarve: o papel da alimentação artificial de praias*. Univ. do Algarve;
14. Pinto, C. A., & Teixeira, S. B. (2022). Desempenho e longevidade de alimentações artificiais de praias em Portugal. *Journal of Coastal Research*, Special Issue



15. Veloso Gomes, F. (2017). Os ensinamentos adquiridos com a alimentação artificial de areias em praias portuguesas com elevados níveis energéticos. In Atas do Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia (CLME 2017). Porto
16. Griggs. (2024). Beach Nourishment: A Critical Look. *Journal of Coastal Research*, 40(5), 962–971.
17. Santos F. D., *et al.*, (2014) Relatório do Grupo de Trabalho do Litoral: Gestão da Zona Costeira, O Desafio da Mudança.
18. Boes, R. M., Auel, C., Hagmann, M., & Albayrak, I. (2014). Sediment bypass tunnels to mitigate reservoir sedimentation and restore sediment continuity. In R. M. Schleiss *et al.* (Eds.), *Reservoir sedimentation*. Taylor & Francis.
19. Sumi, T., & Kantoush, S. A. (2018). Integrated sediment management strategies for sustainable reservoir operation. In *Proceedings of the IAHR International Symposium on River Sedimentation*. Kyoto.
20. Warrick, J. A., *et al.* (2019). World's largest dam removal reverses coastal erosion. *Scientific Reports*, 9, 13968
21. Ferreira, Margarida & Coelho, Carlos & Lima, Márcia & Bernardes, Cristina & Baptista, Paulo & Silva, Paulo & Carvalho, Ricardo & Pound, Malcolm & Aleixo Pinto, Celso. (2023). Feasibility study of sand bypass at Aveiro and Figueira da Foz Inlets. *Coastal Engineering Proceedings*. 65. 10.9753/icce.v37.papers.65.
22. Panos Panagos, Francis Matthews, Edouard Patault, Carlo de Michele, Emanuele Quaranta, *et al.*, Understanding the cost of soil erosion: An assessment of the sediment removal costs from the reservoirs of the European Union. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434, pp.140183. <10.1016/j.jclepro.2023.140183>. <hal-04372625>

Palavras-Chave: erosão costeira; sedimentos; alterações climáticas; alimentação artificial de praias; descarga fluvial.



CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE À EROÇÃO COSTEIRA COM APOIO MULTICRITÉRIO EM GRUPO: APLICAÇÃO DE UM NOVO MÉTODO EM MACEIÓ-AL

Maria Alyne dos Santos LIMA¹, Wesley Douglas Oliveira SILVA¹, Andressa Ellen APOLINÁRIO¹,
Iago José de Lima SILVA¹

1. Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Alagoas (PPGRHS-CTEC/UFAL), Brasil, maria.alyne@ctec.ufal.br; wesley.oliveira@feac.ufal.br; andressaellenadm@hotmail.com; i_ago_lima@hotmail.com

INTRODUÇÃO

A erosão costeira constitui um dos principais desafios ambientais em zonas litorâneas urbanizadas. Na orla da cidade de Maceió (AL), Brasil, esse fenômeno é intensificado pela combinação entre déficit sedimentar, ocupação urbana inadequada e elevação do nível do mar (Njutapvouei *et al.*, 2024). Bairros como Garça Torta, Riacho Doce, Ponta Verde e Jatiúca já registram perda de faixa de areia e comprometimento de infraestruturas da orla, evidenciando fragilidades físicas e socioeconômicas nesses trechos (Silva *et al.*, 2023). Os impactos incluem danos estruturais, ambientais e econômicos que afetam dinâmicas urbanas, ecossistemas e atividades turísticas (Nascimento, Almeida e Silva, 2025; González Hernández *et al.*, 2023). Embora abordagens multicritério sejam amplamente utilizadas para avaliar a vulnerabilidade do litoral, muitos estudos ainda se concentram em métodos baseados em um único decisor (Canul Turrizza *et al.*, 2024; Monioudi *et al.*, 2025). Nesse contexto, este estudo propõe um método de decisão em grupo baseado na Composição Probabilística de Preferências (CPP) para classificar a vulnerabilidade à erosão considerando a variabilidade de preferências na gestão da orla de Maceió.

Palavras-Chave: erosão costeira; decisão em grupo; análise multicritério; CPP-ROC-SORT; gestão costeira

METODOLOGIA

O estudo desenvolveu um novo método de classificação multicritério em grupo denominado CPP-ROC-SORT. As alternativas corresponderam aos trechos da orla marítima de Maceió, analisados a partir de critérios relacionados à dinâmica costeira, distribuídos nas dimensões física, hídrica e antrópica, incluindo variáveis como características geomorfológicas, exposição às ondas, uso e ocupação do solo e intervenções humanas na orla. A partir dessas informações, foi estruturada uma matriz de decisão, composta pelas alternativas (bairros costeiros) e pelos critérios de avaliação, na qual cada elemento representa o desempenho de uma alternativa em relação a um critério específico. Considerando as incertezas inerentes ao problema, esses desempenhos foram representados de forma probabilística pelo CPP, constituindo a base para as etapas subsequentes do método. A definição e a ordenação dos critérios foram realizadas por três especialistas com atuação em geomorfologia costeira, meio ambiente e planejamento urbano, cujas preferências foram incorporadas ao método por meio da ordenação dos critérios, convertida em pesos pelo método Rank Order Centroid (ROC). Em seguida, aplicou-se o procedimento Sorting Problem (SORT), correspondente à problemática multicritério de classificação, no qual as alternativas são alocadas em categorias ordenadas de desempenho a partir da comparação com perfis de referência previamente definidos. A agregação multicritério foi realizada inicialmente por decisor e, posteriormente, em nível de grupo, resultando no índice probabilístico agregado (δ). A alocação nas classes de vulnerabilidade incorporou um limiar de indiferença probabilística (ϵ), sendo os

resultados avaliados por análise de sensibilidade. Por fim, os trechos costeiros foram classificados em níveis de vulnerabilidade à erosão e os resultados foram espacializados em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitindo a integração e visualização dos padrões de vulnerabilidade ao longo da orla maceioense.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação do método CPP-ROC-SORT permitiu classificar nove trechos da orla marítima de Maceió, definidos por bairros litorâneos (A1–A9), em categorias ordenadas de vulnerabilidade à erosão costeira, variando de alta a baixa (C4 a C1). A Figura 1 apresenta os valores do índice probabilístico agregado (δ) e a distribuição espacial das categorias ao longo da linha de costa. Os maiores valores do índice δ foram observados nos bairros de Ponta Verde e Pajuçara, classificados como C4. Esses setores correspondem ao trecho mais urbanizado da orla, com elevada densidade de ocupação e infraestrutura costeira rígida, como contenções e estruturas urbanas próximas à faixa de praia. Essas intervenções reduzem a capacidade natural de dissipação da energia das ondas e alteram a dinâmica sedimentar, contribuindo para os processos erosivos. Jatiúca, Cruz das Almas e Jacarecica foram classificados como C3, no qual representam áreas de transição cuja urbanização já exerce influência relevante, mas ainda coexistem condições geomorfológicas mais favoráveis, como maior largura da faixa praial ou menos infraestrutura costeira, ou seja, há interação progressiva entre processos naturais e pressões antrópicas.

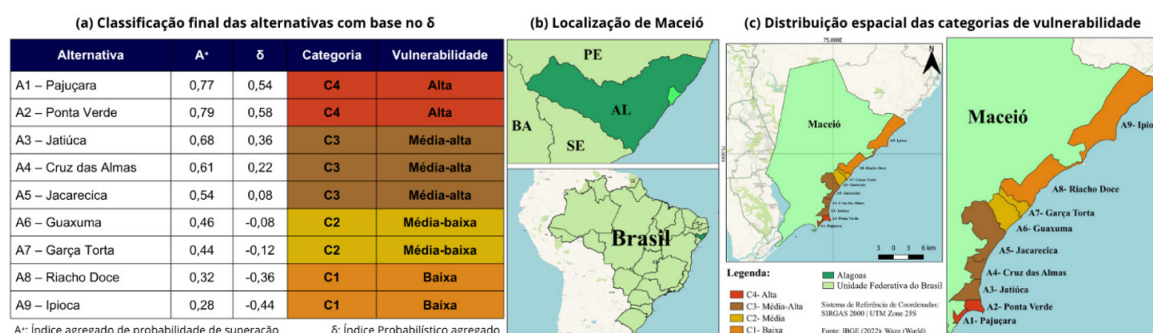


Figura 1: Classificação da vulnerabilidade à erosão costeira ao longo da orla de Maceió (AL) obtida pelo método CPP-ROC-SORT.

Já ao norte da orla, observa-se redução mais expressiva da vulnerabilidade, ao qual Guaxuma e Garça Torta foram classificados como C2 – média-baixa vulnerabilidade, refletindo menor intensidade de ocupação urbana e maior presença de ambientes costeiros relativamente preservados. Por fim, Riacho Doce e Ipioca apresentaram os menores valores do índice δ , sendo enquadrados na categoria C1 – baixa vulnerabilidade, associados a maior largura de praia, menor pressão antrópica e condições geomorfológicas mais estáveis. De forma geral, os resultados evidenciam um gradiente espacial de vulnerabilidade ao longo da orla maceioense, no qual os níveis mais elevados concentram-se no setor sul mais urbanizado, diminuindo progressivamente em direção aos trechos menos ocupados do litoral norte.

Esse padrão reflete a influência combinada de fatores físicos, hidrodinâmicos e antrópicos na dinâmica erosiva costeira. A espacialização das categorias em ambiente SIG permitiu identificar áreas prioritárias para diferentes estratégias de gestão, desde intervenções estruturais e soluções baseadas na natureza nos setores mais vulneráveis até políticas de conservação e controle do uso do solo nos trechos de menor vulnerabilidade. Nesse sentido, o método proposto demonstra potencial como ferramenta de apoio à decisão para o planejamento e a gestão integrada da zona costeira.



CONCLUSÃO

O método CPP-ROC-SORT demonstrou elevada capacidade para classificar a vulnerabilidade à erosão costeira ao integrar múltiplos critérios, diferentes perspectivas técnicas e o tratamento explícito da incerteza no processo decisório. Os resultados evidenciaram um padrão espacial consistente ao longo da orla de Maceió, no qual a intensificação da urbanização está associada aos níveis mais elevados de vulnerabilidade. A abordagem probabilística aumentou o realismo da classificação ao incorporar a variabilidade das avaliações dos decisores em contextos ambientais complexos. Como principal contribuição metodológica, destaca-se a integração entre decisão em grupo e modelagem probabilística, ampliando a robustez e a transparência da análise multicritério. Do ponto de vista aplicado, o método demonstrou potencial para subsidiar políticas públicas e instrumentos de planeamento costeiro, permitindo identificar áreas prioritárias para intervenção, monitoramento ou conservação. Apesar de depender da qualidade e disponibilidade dos dados utilizados, a abordagem apresenta consistência teórica e aplicabilidade prática para o apoio à gestão de zonas costeiras urbanizadas.

REFERÊNCIAS

- CANUL TURRIZA, Román A. *et al.* Coastal vulnerability assessment with a hierarchical coastal segments approach. *Ocean and Coastal Management*, v. 249, 106989, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106989>.
- GONZÁLEZ HERNÁNDEZ, M.M.; LEÓN, C.J.; GARCÍA, C.; LAM-GONZÁLEZ, Y.E. Assessing the climate-related risk of marine biodiversity degradation for coastal and marine tourism. *Ocean & Coastal Management*, v. 232, art. 106436, 2023. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2022.106436.
- MONIOUDI, I. N. *et al.* A prioritization framework for adaptation responses for climate change-induced erosion in island beaches—Cases from the Aegean Islands, Greece. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 13, n. 3, p. 491, 2025. <https://doi.org/10.3390/jmse13030491>.
- NASCIMENTO, M. R. do; ALMEIDA, H. R. R. de C.; SILVA, D. F. da. Análise e mapeamento da degradação costeira do litoral de Maceió – Alagoas, Brasil. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, v. 24, n. 2, p. 119-132, 2025. DOI: 10.5894/rgci-n596.
- NJUTAPVOUI, N. F., Raphael, O., Achab, M., Loudi, Y., Minette, T. E., Kambia, P., ... & Romaric, N. (2024). Integrated Assessment of Coastal Vulnerability in the Bonny Bay: A Combination of Traditional Methods (Simple and AHP) and Machine Learning Approach. *Estuaries and Coasts*, 47(9), 2670-2695.
- SILVA, J. P. L. S.; FERREIRA, M. E. S.; FERREIRA, B.; SILVA, T. C. L. Erosão costeira nas praias urbanas de Maceió: análise da redução da faixa de areia e danos à infraestrutura. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA (SINAGEO), 14., 2023, Corumbá. Anais... Corumbá: SINAGEO, 2023.

MAPEAMENTO E ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA EM CONTEXTO INSULAR COM RECURSO A ÍNDICES MULTIESPECTRAIS: ESTUDO DE CASO NO ARQUIPÉLAGO DA MADEIRA

Ana Cristina Freitas GOMES¹, Romeu GERARDO^{1,2}, Isabel Pedroso de LIMA^{1,3}

1. Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal, emailanagomes@gmail.com, romeu.jorge@uc.pt, iplima@uc.pt

2. CERIS, Universidade de Coimbra / Itecons - Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade, Coimbra, Portugal

3. MARE/ARNET – Centro de Ciências do Mar e do Ambiente / Rede de Investigação Aquática, Portugal

RESUMO

As zonas costeiras encontram-se entre os territórios mais expostos às pressões ambientais e antrópicas da atualidade. A conjugação entre alterações climáticas, crescimento das atividades humanas e concentração populacional nas áreas litorais intensifica processos de erosão, instabilidade e transformação morfológica, com particular expressão em contextos insulares. Dada a natureza dinâmica destes sistemas, a sua monitorização é essencial para apoiar estratégias de proteção, adaptação e desenvolvimento sustentável. Neste contexto, as técnicas de deteção remota têm-se afirmado como ferramentas eficazes e economicamente acessíveis para o mapeamento sistemático de linhas de costa, permitindo acompanhar a sua evolução em regiões de elevada complexidade geomorfológica.

O arquipélago da Madeira, localizado no Atlântico Norte, a sudoeste de Portugal continental, entre as latitudes 30° e 33° N e as longitudes 15° e 17° W, foi selecionado como estudo de caso pela sua vulnerabilidade costeira, diversidade geomorfológica e reduzida expressão em estudos de deteção remota na região, constituindo uma oportunidade para aprofundar a aplicabilidade desta abordagem metodológica. Foram analisadas duas áreas com características contrastantes: Área 1 – Porto Santo, dominada por praia arenosa, na costa sul da ilha com o mesmo nome, e Área 2 – Santana, na costa norte da Ilha da Madeira, caracterizada por arribas densamente vegetadas e praias estreitas de seixos. Representadas na Figura 1, ambas as áreas foram identificadas no Relatório de Avaliação de Risco da Região Autónoma da Madeira (2023) como altamente suscetíveis à erosão costeira.

Foram utilizadas imagens dos satélites Sentinel-2, em projeção UTM/WGS84 e nível de processamento 2A, obtidas em acesso aberto através do Copernicus Data Space Ecosystem. Esta constelação oferece cobertura sistemática, resolução espacial de 10 m na maioria das bandas multiespectrais e revisita de 3-5 dias, características adequadas à monitorização costeira. A disponibilidade de imagens encontra-se limitada por diversos fatores associados à tipologia do local de estudo (ilhas oceânicas), nomeadamente pela cobertura de nuvens, agitação marítima e espuma do rebentamento das ondas, pelo que a seleção neste estudo privilegiou os meses de verão, período em que estas condições são menos frequentes, minimizando também os efeitos da sazonalidade da praia. A correção para as variações de maré não foi aplicada, mas a seleção procurou reduzir a sua influência, em particular, porque as imagens foram captadas por volta do meio-dia e durante a maré baixa.

Este estudo teve como principal objetivo avaliar o potencial de diferentes índices multiespectrais, nomeadamente o NDWI (Normalized Difference Water Index; McFeeters, 1996), MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index; Xu, 2006), ANDWI (Augmented Normalized Difference Water Index; Rad *et al.*, 2021) e NDVI (Normalized Difference Vegetation Index; Rouse *et al.*, 1974), calculados a partir de dados do Sentinel-2 utilizando o software QGIS, para mapear automaticamente linhas

de costa nas ilhas da Madeira e do Porto Santo. Enquanto os índices NDWI, MNDWI e ANDWI foram desenvolvidos para deteção de superfícies de água, sendo expectável a sua aplicabilidade ao estudo de linhas de costa, o NDVI, um índice de vegetação, foi explorado como indicador complementar em arribas densamente vegetadas, como Santana. As aplicações foram desenvolvidas com uma resolução espacial de 10 m, realizando-se a reamostragem de certas bandas através do método do vizinho mais próximo. Os índices multiespectrais foram combinados com duas abordagens de classificação: (i) adoção do limiar de referência zero, e (ii) determinação de limiar ótimo por seleção dinâmica, combinando o método de Otsu, a distância Jeffries-Matusita (J-M) e o Modelo de Mistura Gaussiana, com o objetivo de maximizar a separabilidade entre as classes água e não-água.



Figura 1 – Áreas de estudo: Área 1 – Porto Santo e Área 2 – Santana.

A Figura 2 ilustra os resultados obtidos, apresentando o mapeamento do índice NDWI, e respetivo mapa binário resultante da classificação recorrendo ao correspondente limiar dinâmico, para a área de estudo em Santana.

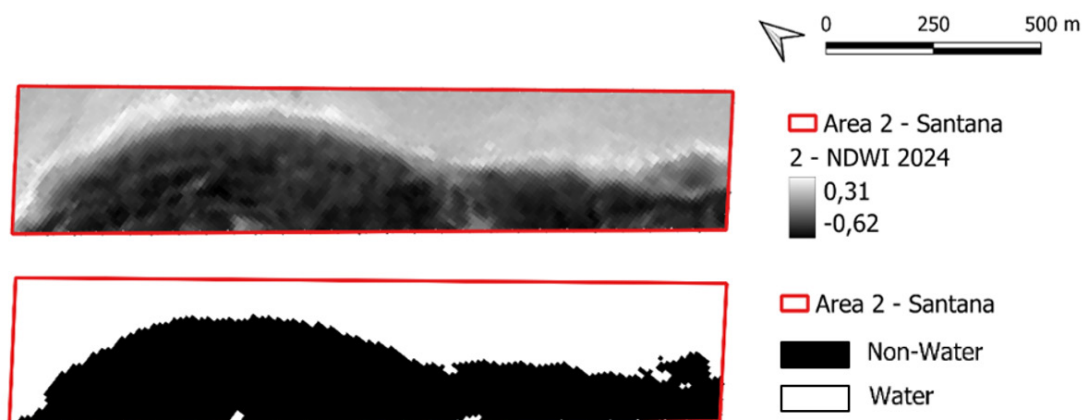


Figura 2 – Mapeamento do índice NDWI e respetivo mapa binário resultante de classificação recorrendo ao correspondente limiar dinâmico, para a área de estudo em Santana.

De uma forma geral, os resultados evidenciaram desempenhos semelhantes entre os diferentes índices para uma mesma área, embora com diferenças locais na configuração das linhas de costa extraídas. O índice NDWI revelou o desempenho mais estável nas duas áreas de estudo e em ambas as abordagens de classificação. A validação, baseada nas métricas Overall Accuracy e coeficiente Kappa, revelou resultados globalmente muito positivos, com valores de Kappa sempre superiores a 0.61, correspondendo a níveis de concordância substancial a quase perfeita.

O estudo da costa no Porto Santo apresentou resultados mais consistentes em relação a Santana, sugerindo que a classificação com limiar dinâmico é mais robusta em contextos geomorfológicos menos complexos, como praias arenosas. A análise temporal da configuração da linha de costa



da Área 1 (Porto Santo), entre 2019 e 2024, revelou um recuo predominante face à acreção, tendo o setor ocidental apresentado a erosão mais significativa. Em contraste, a acreção foi observada apenas no lado oriental, com ganhos muito inferiores ao recuo do lado oposto. No âmbito deste estudo, as imagens de Sentinel-2 conferem confiança à deteção da evolução da linha de costa, ainda que não à sua quantificação exata.

Quanto ao desempenho do índice NDVI, este revelou um comportamento distinto consoante a tipologia de costa: em áreas densamente vegetadas, como em Santana, os seus resultados de classificação foram comparáveis aos dos índices de água, mas em ambientes de praia sem vegetação apenas teve um desempenho adequado com o limiar zero. Esta limitação decorre da natureza do próprio índice, que não foi concebido especificamente para a deteção de massas de água, assentando antes no contraste proporcionado pela vegetação, uma dependência que também justifica não se ter avançado, em Santana, para a quantificação da evolução da linha de costa, uma vez que variações no NDVI podem não refletir necessariamente um recuo real da arriba.

Conclui-se que os mapas água/não-água gerados a 10 m de resolução confirmam a aplicabilidade de índices multiespectrais no mapeamento de diferentes tipos de linhas de costa. Embora a resolução espacial dos dados do Sentinel-2 constitua uma limitação intrínseca da abordagem adotada, esta é compensada pela elevada cobertura espacial e temporal, pela disponibilidade gratuita dos dados e pela possibilidade de monitorização sistemática de extensas áreas. Estas características contrastam com as de métodos mais convencionais ou de outras fontes de dados de deteção remota, que, embora proporcionem maior resolução espacial, tendem a apresentar custos mais elevados e menor disponibilidade para aplicações à escala territorial e temporal pretendidas. Os resultados obtidos demonstram, assim, que a metodologia constitui uma ferramenta operacional para a monitorização da evolução da linha de costa e para o apoio à gestão e adaptação de regiões insulares sujeitas a erosão e a outros riscos costeiros.

Palavras-Chave: Sentinel-2; deteção remota; monitorização costeira; Ilha da Madeira; Ilha de Porto Santo



INUNDAÇÕES COSTEIRAS SOB CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO RIO TEJIPIÓ, PERNAMBUCO (BRASIL)

Yuri Tomaz NEVES¹, Italo Roberto O. NÓBREGA², Lysanne Souza de MOURA³,
Amanda Machado PEREIRA⁴, Daniele de Souza SANTOS⁵, Gadadhara de Figueiredo FERRAZ⁶,
Jaime Joaquim da Silva Pereira CABRAL⁷

1. UFPE, TPF Engenharia e UNIFIP, Recife - PE (Brasil), yuutomaz@gmail.com

2. TPF Engenharia, Patos - PB (Brasil), ironobrega@gmail.com

3. TPF Engenharia, Manaus - AM (Brasil), englysanne@gmail.com

4. UFPE e TPF Engenharia, Recife - PE (Brasil), amanda.machadop@ufpe.br

5. TPF Engenharia, Patos - PB (Brasil), dani20ssantos@gmail.com

6. TPF Engenharia, Recife - PE (Brasil), gadadharaff@gmail.com

7. UFPE e UPE, Recife - PE (Brasil), jaime.cabral@ufpe.br

INTRODUÇÃO

Na Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (Cobrade), as inundações correspondem a um tipo de desastre natural hidrológico, em que ocorre a submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas, sendo as inundações costeiras associadas à elevação do nível do mar. A bacia hidrográfica do rio TejiPIó vem enfrentando sérios problemas com inundações costeiras, agravados pela alta vulnerabilidade de sua área urbana, caracterizada por baixas altitudes e elevado grau de urbanização. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar inundações costeiras na bacia hidrográfica do rio TejiPIó sob cenários de mudanças climáticas.

ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio TejiPIó possui área de aproximadamente 72,6 km², distribuída entre os municípios de Recife (68%), Jaboatão dos Guararapes (24,7%) e São Lourenço da Mata (7,3%), no estado de Pernambuco (Brasil). A bacia está sujeita à níveis de maré que variam entre as cotas de -0,92 m e 1,88 m, com valor médio de 0,46 m, referenciadas ao datum vertical do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

MODELAGEM HIDRODINÂMICA E CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A modelagem hidrodinâmica foi realizada no HEC-RAS 7.0 com abordagem bidimensional, utilizando o Modelo Digital de Terreno (MDT) do programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), obtido por meio de tecnologia LiDAR, com resolução espacial de 1 m e precisão altimétrica de 25 cm. Esses dados laser não contêm informação de níveis d'água da hidrografia. Dessa forma, foi realizada a correção utilizando centenas de seções transversais do cadastro do sistema de macrodrenagem do Recife disponibilizado pela Autarquia de Manutenção e Limpeza Urbana do Recife (EMLURB). Em função de diversas intervenções que estão sendo estudadas e implantadas na bacia do rio TejiPIó, foram realizados levantamentos topográficos de campo em diferentes áreas, os quais foram considerados no modelo com o objetivo de atualizar e refinar a representação altimétrica do terreno. Esses levantamentos incluíram campanhas planialtimétricas, aerolevantamentos e batimetria, realizadas desde 2024 e foram representados por MDT com resolução espacial de 0,05 m.

O modelo hidrodinâmico foi previamente calibrado e validado mediante ajuste do coeficiente de rugosidade de Manning. A malha é composta por células com dimensões de 20 m x 20 m e refinamentos que variam entre 0,1 m x 0,1 m e 5 m x 5 m. Os efeitos da ocupação urbana sobre o escoamento foram incorporados por meio da definição dos coeficientes de rugosidade de Manning, distribuídos ao longo da malha a partir de dados de cobertura do solo.

Foram considerados quatro cenários hidrodinâmicos de inundação costeira, contemplando exclusivamente os efeitos da maré, representados por uma condição de contorno externa do tipo *Stage Hydrograph*. O primeiro representa condições atuais, com a probabilidade de excedência dos níveis máximos diários de maré de 50% o que corresponde a maré de aproximadamente 1,28m (DHN, 2026), referenciada ao datum vertical do IBGE. Os demais cenários incorporam projeções do nível do mar do 6º Relatório de Avaliação (AR6) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) para o cenário SSP2-4.5 nos horizontes de 2050 (+0,21 m), 2070 (+0,34 m) e 2100 (+0,57 m) (Fox-Kemper *et al.*, 2021; Kopp *et al.*, 2023; Garner *et al.*, 2021), correspondendo a níveis d'água (NA) de 1,49 m, 1,62 m e 1,85 m, respectivamente. Os resultados indicaram aumento progressivo dos impactos com a elevação do nível do mar. Em relação ao cenário com NA de 1,28 m, no qual foram identificadas aproximadamente 336 famílias atingidas e área inundada de 134,68 ha, os cenários com NA de 1,49 m, 1,62 m e 1,85 m apresentaram aumentos de aproximadamente 133%, 246% e 898% no número de famílias atingidas e de 18%, 34% e 73% na área inundada, respectivamente. A Figura 1 a seguir apresenta as manchas de inundação dos cenários analisados.

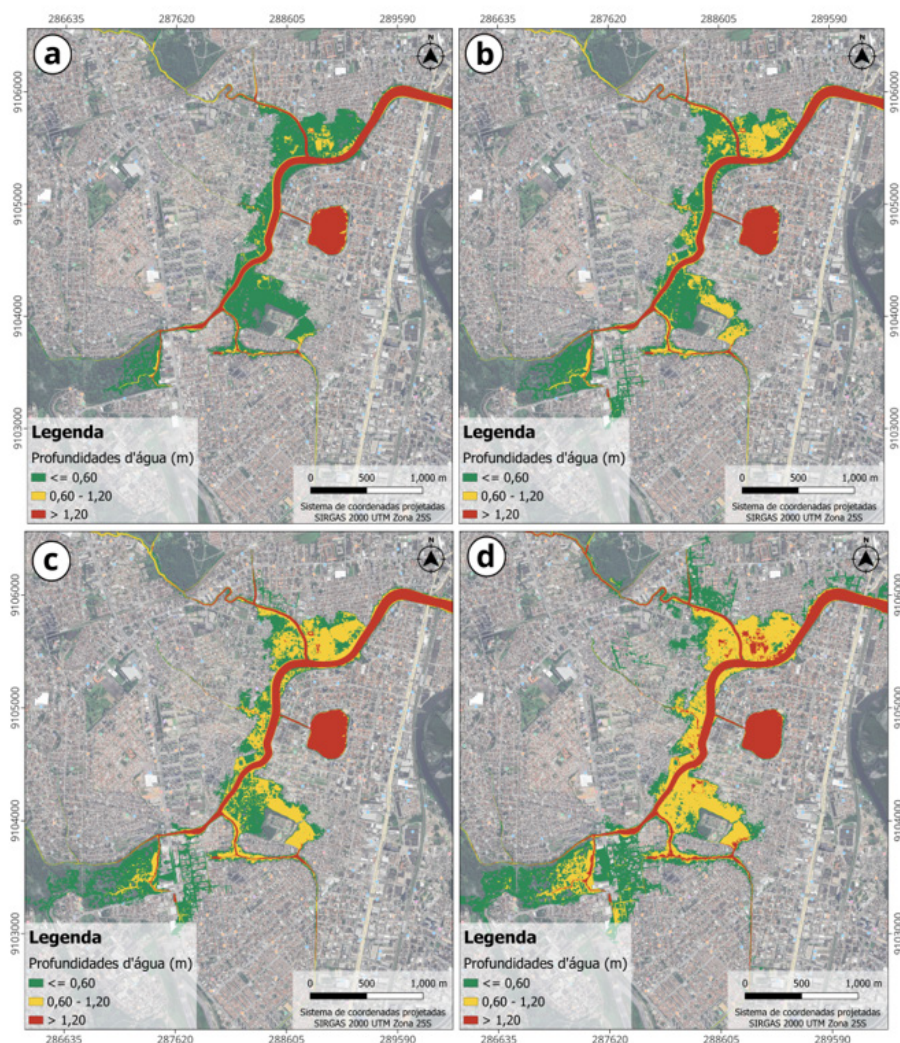


Figura 1 - Manchas de inundação costeira associadas aos cenários de maré: (a) condição atual com 50% de probabilidade de excedência (1,28 m); (b) cenário de 2050 (1,49 m); (c) cenário de 2070 (1,62 m); e (d) cenário de 2100 (1,85 m).



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos contribuem para o planeamento urbano e a gestão dos riscos de inundações costeiras na bacia hidrográfica do rio Tejiptó, subsidiando a definição de áreas prioritárias para adaptação, a avaliação de intervenções estruturais e não estruturais e o planeamento de estratégias frente às mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). Tábuas de maré da estação Porto do Recife para o período de 2000 a 2026. Rio de Janeiro: DHN, 2026.

FOX-KEMPER, B.; HEWITT, H. T.; XIAO, C.; ADALGEIRSDÓTTIR, G.; DRIJFHOUT, S. S.; EDWARDS, T. L.; GOLLEDGE, N. R.; HEMER, M.; KOPP, R. E.; KRINNER, G.; MIX, A.; NOTZ, D.; NOWICKI, S.; NURHATI, I. S.; RUIZ, L.; SALLÉE, J.-B.; SLANGEN, A. B. A.; YU, Y. Ocean, cryosphere and sea level change. In: MASSONDELLOTTE, V. *et al.* Climate change 2021: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

GARNER, G. G.; HERMANS, T.; KOPP, R. E.; SLANGEN, A. B. A.; EDWARDS, T. L.; LEVERMANN, A.; NOWICKI, S.; PALMER, M. D.; SMITH, C.; FOX-KEMPER, B.; HEWITT, H. T.; XIAO, C.; ADALGEIRSDÓTTIR, G.; DRIJFHOUT, S. S.; GOLLEDGE, N. R.; HEMER, M.; KRINNER, G.; MIX, A.; NOTZ, D.; NURHATI, I. S.; RUIZ, L.; SALLÉE, J.-B.; YU, Y.; HUA, L.; PALMER, T.; PEARSON, B. IPCC AR6 sea level projections. Zenodo, 2021.

KOPP, R. E.; GARNER, G. G.; JHA, S.; HERMANS, T. H. J.; REEDY, A.; SLANGEN, A. B. A.; TURILLI, M.; MERZKY, A.; KOUBBE, G. The framework for assessing changes to sea-level (FACTS): a modular platform for probabilistic sea-level projections. Geoscientific Model Development, v. 16, p. 7461-7489, 2023.

Palavras-Chave: IPCC; AR6; SSP2-4.5; HEC-RAS 7.0.



A IMPORTÂNCIA DOS REFERENCIAIS VERTICAIS EM ÁREA COSTEIRA DO BRASIL E IMPLICAÇÕES NA MODELAGEM HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL

Yuri Tomaz NEVES¹, Gastão Cerquinha da FONSECA NETO²,
Jaime Joaquim da Silva Pereira CABRAL³

1. UFPE, TPF Engenharia e UNIFIP, Recife - PE (Brasil), yuutomaz@gmail.com

2. UFPE e CEMADEN, Recife - PE (Brasil), gastaocerquinha@gmail.com

3. UFPE e UPE, Recife - PE (Brasil), jaime.cabral@ufpe.br

INTRODUÇÃO

No Brasil, a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), por meio do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), disponibiliza níveis de maré em tábuas referenciadas ao Nível de Redução (NR). Por outro lado, em estudos de modelagem hidrodinâmica bidimensional, são comumente empregados Modelos Digitais de Terreno (MDT) referenciados ao zero vertical do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que corresponde ao nível médio do mar da estação maregráfica de Imbituba (SC). Diante da utilização de referenciais verticais distintos, torna-se necessária sua compatibilização. A adoção de relações de conversão inadequadas introduz erros, podendo levar à sub ou superestimativa das cotas de inundação em áreas costeiras, afetando avaliações de risco e a definição de intervenções. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo estabelecer as relações entre os referenciais de nível da estação maregráfica do Porto do Recife e do IBGE, bem como analisar suas implicações na bacia hidrográfica do rio Tejió por meio de modelagem hidrodinâmica bidimensional.

ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Tejió possui área de aproximadamente 72,6 km², distribuída entre os municípios de Recife (68%), Jaboatão dos Guararapes (24,7%) e São Lourenço da Mata (7,3%), no estado de Pernambuco (Brasil). A bacia apresenta precipitação acumulada anual de 2155,5 mm (INMET, 2020) e está sujeita à influência das marés, cujos níveis variam entre as cotas de -0,10 m e 2,70 m, com valor médio de 1,28 m (DHN, 2026). A dinâmica das marés exerce grande influência sobre a rede hidrográfica, devido à incursão em frequência semidiurna, o que altera o sentido do escoamento ao longo do dia e pode provocar acúmulos de água em vias públicas, calçadas, edificações e outras infraestruturas urbanas mais baixas, mesmo sem chuvas. Além dos fatores chuva e maré, a vulnerabilidade da área urbana da bacia, por apresentar baixas altitudes e elevado grau de urbanização, constitui fator agravante.

REFERENCIAIS VERTICAIS E MODELAGEM HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL

A relação entre os referenciais verticais DHN e IBGE foi estabelecida utilizando a Ficha F-41 da estação maregráfica Porto do Recife, que indica um valor de NR igual a 0,477 m e apresenta a possibilidade de estabelecimento de compatibilização com duas Referências de Nível (RNs) do IBGE: RN-393T-IBGE e RN-2603F-IBGE (DHN, 2010). A compatibilização com o referencial vertical do IBGE foi realizada com base na RN-2603F-IBGE, uma vez que a RN-393T-IBGE apresentou situação como “NÃO ENCONTRADO”, conforme indicado no relatório de estação geodésica do IBGE (2022). A RN-2603F-IBGE apresenta situação como “BOM” e altitude normal de 2,7977 m (IBGE, 2021).

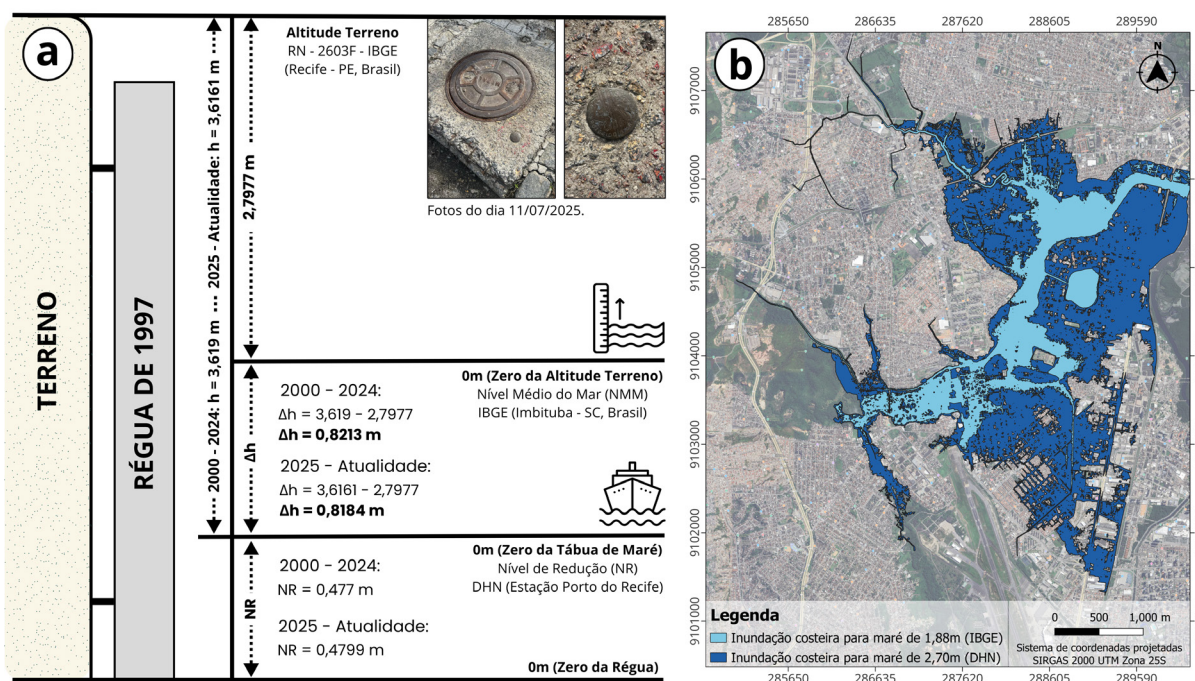
A relação entre os referenciais evidencia que o zero da tábua de maré (NR) se encontra abaixo do referencial vertical do IBGE, resultando em uma diferença vertical de 0,8213 m. Dessa forma, a conversão dos níveis de maré do sistema DHN para o IBGE é realizada conforme a Equação 1.

$$\text{Maré}_{\text{IBGE}}(\text{m}) = \text{Maré}_{\text{DHN}}(\text{m}) - 0,8213 \quad \text{Equação 1}$$

Em 2025, a equipe do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), informou que uma melhoria recente no software utilizado para a geração das previsões de maré, a qual pode ocasionar pequenas variações no cálculo das constantes harmônicas, resultou na alteração do valor do NR. Para a estação maregráfica Porto do Recife, o NR passou a ser de 0,4799 m, implicando em uma diferença altimétrica de 0,8184 m entre os referenciais DHN e IBGE. Dessa forma, estabelece-se uma nova relação de conversão a partir de 2025, conforme apresentada na Equação 2.

$$\text{Maré}_{\text{IBGE}}(\text{m}) = \text{Maré}_{\text{DHN}}(\text{m}) - 0,8184 \quad \text{Equação 2}$$

A consistência dessas relações foi verificada por meio de medições de campo realizadas pelos autores. Para avaliar a influência da compatibilização dos níveis, foi realizada, no HEC-RAS 7.0, uma modelagem hidrodinâmica bidimensional na bacia hidrográfica do rio Tejiú, considerando a maior maré da estação maregráfica Porto do Recife, de 2,70 m (DHN), que, após conversão, corresponde a aproximadamente 1,88 m no referencial do IBGE. A maré de 2,70 m (DHN) apresentou uma área inundada de aproximadamente 228% superior àquela associada a maré de 1,88 m (IBGE), evidenciando a importância da adequada compatibilização dos referenciais verticais na modelagem hidrodinâmica bidimensional. A figura a seguir apresenta, de forma esquemática, a relação entre os referenciais verticais adotados e os respectivos desníveis considerados no processo de compatibilização, bem como as manchas de inundação costeira resultantes.



(a) Relação entre os referenciais verticais DHN e IBGE; (b) comparação das manchas de inundação associadas aos níveis de maré de 2,70 m (DHN) e 1,88 m (IBGE).



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados evidenciam que a compatibilização entre os referenciais verticais do DHN e do IBGE é indispensável à modelagem hidrodinâmica em áreas costeiras. As diferenças observadas impactam significativamente as áreas inundadas, com aumento de cerca de 228% na ausência de compatibilização. Dessa forma, sua integração adequada é fundamental para assegurar a confiabilidade dos resultados e subsidiar a avaliação de risco e o planejamento de intervenções.

REFERÊNCIAS

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). Ficha F-41: descrição da estação maregráfica Porto do Recife (30645). Rio de Janeiro: DHN, 2010.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). Tábuas de maré da estação Porto do Recife para o período de 2000 a 2026. Rio de Janeiro: DHN, 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Relatório de estação geodésica: 393T (referência de nível - RN). Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Relatório de estação geodésica: 2603F (referência de nível - RN). Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Normais climatológicas do Brasil (1991-2020). 2020. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 18 abr. 2026.

Palavras-Chave: bacia hidrográfica do rio Tejió; referenciais verticais; HEC-RAS 7.0.



AMOSTRAGEM ADAPTATIVA COM AUVS USANDO DESCRITORES DE REGIMES DE TEMPERATURA NO CANHÃO DA NAZARÉ

Pedro Marques LOBÃO¹, João BORGES DE SOUSA², Renato MENDES³

1. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (LSTS),
up202107522@up.pt

2. Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (LSTS), Porto, Portugal, jtasso@fe.up.pt

3. Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (LSTS), Porto, Portugal, rpsm@lsts.pt

INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

A oceanografia operacional depende de previsões e nowcasts fiáveis para apoiar a monitorização ambiental e a tomada de decisão em zonas costeiras. Contudo, as observações in situ continuam escassas devido ao custo, à logística e à cobertura limitada de campanhas com navios e infraestruturas fixas. Os veículos autónomos subaquáticos (AUVs) podem complementar estas redes de observação, recolhendo medições de elevada resolução ao longo de trajetórias planeadas. Ainda assim, a autonomia energética limitada, as comunicações intermitentes, as restrições de segurança e a forte variabilidade espacial e temporal dos processos costeiros tornam a escolha de onde amostrar um problema de decisão sob incerteza.

Este trabalho é motivado pelo contexto do Canhão da Nazaré, uma região costeira complexa onde a batimetria, a circulação e os gradientes térmicos podem gerar estruturas espaciais heterogéneas. Em abordagens de amostragem adaptativa orientadas por modelos, mapas de desvio-padrão (STD) podem ser usados como mapas de recompensa, guiando os AUVs para regiões onde a previsão é mais incerta. No entanto, a incerteza não representa necessariamente toda a organização espacial do campo de temperatura previsto, incluindo frentes, gradientes, fronteiras e regimes térmicos recorrentes.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar se descritores espaciais derivados de regimes recorrentes de temperatura podem complementar um planeador adaptativo orientado por incerteza, sem substituir o STD como referência operacional. A questão central é saber se informação estrutural sobre o campo de temperatura pode alterar as trajetórias de forma interpretável, mantendo simultaneamente o comportamento de procura de regiões incertas.

METODOLOGIA

A metodologia proposta combina uma etapa offline de aprendizagem de regimes com uma etapa de planeamento diário. Na etapa offline, são usados 370 mapas históricos de temperatura de superfície numa região de interesse do Canhão da Nazaré. Estes mapas são pré-processados numa grelha comum e representados através de representações compactas inspiradas em modelos de amostragem adaptativa em robótica marinha. O processo inclui extração de patches, dictionary learning, codificação esparsa e agrupamento hierárquico de Ward, resultando numa biblioteca de seis classes de regimes de temperatura de campo completo.

Cada classe é representada por um protótipo espacial. A partir destes protótipos são extraídos descritores compatíveis com o planeador, incluindo mapas de proximidade a fronteiras, zonas representativas, regiões frias e quentes e mapas de interesse. Estes descritores não são interpretados como rótulos independentes por célula, mas sim como informação espacial derivada do padrão recorrente associado a cada classe.

Na etapa de planeamento, o campo de temperatura previsto para um determinado dia é usado apenas para selecionar a classe mais próxima da biblioteca. Depois, os descritores do protótipo correspondente são recuperados e combinados com o mapa STD do mesmo dia. A recompensa de base é dada por $R_{base}(s) = STD_{norm}(s)$, enquanto as formulações enriquecidas usam uma combinação ponderada entre STD e um descritor normalizado. O planeador existente é mantido sem alterações, sendo modificados apenas os mapas de recompensa fornecidos como entrada.

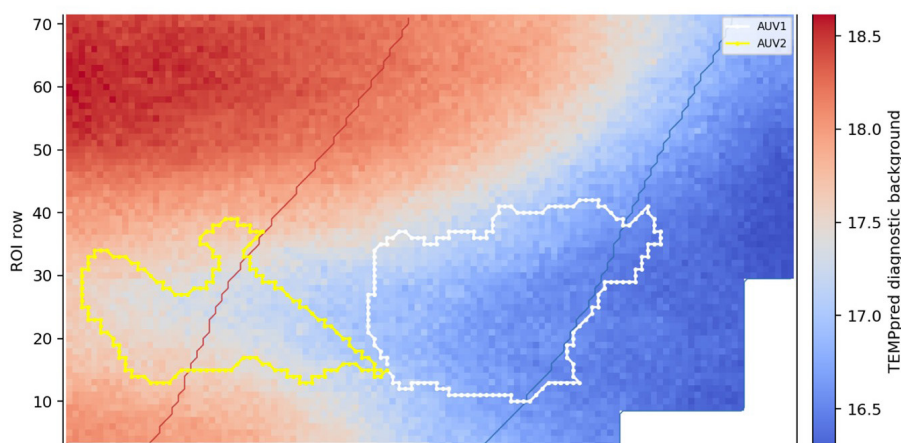


Figura 1. Planeamento multi-AUV enriquecido por descritores de regimes. As trajetórias são comparadas sobre um campo diagnóstico, enquanto o TEMPpred é usado no método apenas para seleção da classe de regime.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As experiências foram realizadas em cenários com um e múltiplos AUVs, usando a mesma região de interesse, máscara operacional, grelha e duração de missão. A comparação entre o planeamento baseado apenas em STD e as formulações enriquecidas avaliou a retenção de STD, a resposta aos descritores, a geometria das rotas, a sobreposição entre veículos, o tempo de execução e métricas externas de variabilidade recente.

Os resultados indicam que os descritores derivados de protótipos podem alterar o comportamento do planeador de forma interpretável, sobretudo em casos com estrutura de fronteira clara. Em algumas configurações, as rotas enriquecidas preservaram uma fração elevada da recompensa de incerteza, ao mesmo tempo que se tornaram mais sensíveis a zonas de fronteira ou regiões representativas do regime térmico selecionado. Nos testes com múltiplos AUVs, mapas específicos por veículo incentivaram alguma especialização espacial, embora a redução robusta de sobreposição exija mecanismos explícitos de coordenação ou penalização de redundância.

A interpretação dos resultados é conservadora. O trabalho não demonstra melhoria direta da assimilação de dados, da qualidade de previsão ou da redução de incerteza do modelo oceânico. Em vez disso, fornece uma cadeia reprodutível para introduzir informação espacial consciente de regimes em mapas de recompensa para planeamento AUV e para avaliar como essa informação modifica as trajetórias geradas.

CONCLUSÕES

A principal contribuição é uma metodologia reprodutível que liga a descoberta de regimes térmicos recorrentes à construção de mapas de recompensa para amostragem adaptativa com AUVs. O STD permanece como referência operacional, enquanto os descritores de regimes fornecem contexto espacial adicional sobre gradientes, fronteiras e zonas representativas. Esta abordagem pode apoiar estratégias de amostragem mais interpretáveis em zonas costeiras heterogêneas, constituindo um passo intermédio para futuros estudos que liguem diretamente o planeamento das trajetórias ao impacto na assimilação de dados e na previsão oceânica.

Palavras-Chave: amostragem adaptativa; AUV; regimes de temperatura; planeamento orientado por incerteza; Canhão da Nazaré.





ÍNDICE REMISSIVO

49	A IMPORTÂNCIA DOS REFERENCIAIS VERTICAIS EM ÁREA COSTEIRA DO BRASIL E IMPLICAÇÕES NA MODELAGEM HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL	157
	<i>Yuri Tomaz NEVES, Gastão Cerquinha da FONSECA NETO, Jaime Joaquim da Silva Pereira CABRAL</i>	
56	AMOSTRAGEM ADAPTATIVA COM AUVS USANDO DESCRITORES DE REGIMES DE TEMPERATURA NO CANHÃO DA NAZARÉ	76
	<i>Pedro Marques LOBÃO, João BORGES DE SOUSA, Renato MENDES</i>	
8	AMOSTRAGEM ADAPTATIVA COM AUVS USANDO DESCRITORES DE REGIMES DE TEMPERATURA NO CANHÃO DA NAZARÉ	160
	<i>Pedro Marques LOBÃO, João BORGES DE SOUSA, Renato MENDES</i>	
	ANÁLISE DO EFEITO DO APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS PARA A PROTEÇÃO COSTEIRA NA ZONA NORTE DE PORTUGAL	63
	<i>Daniel CLEMENTE, Felipe TEIXEIRA-DUARTE, Paulo ROSA-SANTOS, Francisco TAVEIRA-PINTO</i>	
33	COASTA: VÍDEO-MONITORIZAÇÃO E DEMOCRATIZAÇÃO DO HIDRALERTA PARA A GESTÃO DO RISCO COSTEIRO EM PORTUGAL	81
	<i>Larize LIMA, Filomena MARTINS, Conceição FORTES, Liliana PINHEIRO</i>	
9	COASTSCAN - PLATAFORMA INTEGRADA PARA VÍDEO MONITORIZAÇÃO COSTEIRA	83
	<i>Diogo OLIVEIRA, André CARDOSO, Francisco CERDA, Bruno ROCHA, Paulo BAPTISTA</i>	
48	EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DO LITORAL DA REGIÃO CENTRO DE PORTUGAL (2018-2025): ESMORIZ-FURADOURO, SÃO JACINTO E COSTA NOVA-VAGUEIRA	23
	<i>Ana Margarida FERREIRA, Carlos COELHO, Paulo A. SILVA</i>	
28	ANÁLISE TEMPORAL DA EROSIÃO NO ALGAR DE BENAGIL COM BASE EM MODELOS DIGITAIS DE ELEVADA PRECISÃO OBTIDOS POR LIDAR	16
	<i>Guilherme S. ROCHA, Cláudio SOUSA, Luís SOUSA</i>	
4	ATLANTICSENSE: UMA PLATAFORMA METEOCEANOGRÁFICA OPERACIONAL PARA PREVISÃO DE PERIGOS COSTEIROS EM PORTUGAL	88
	<i>Nícolás de Assis BOSE, Soraia ROMÃO, Luíz Pedro ALMEIDA, Catarina CECÍLIO, Andreia SILVA, Francisco CAMPUZANO, Caio FONTELES</i>	
22	ATUALIZAÇÃO DA ANÁLISE DA EVOLUÇÃO TOPO-BATIMÉTRICA DA COVAGALA COM OS LEVANTAMENTOS COSMO DE 2025	138
	<i>Filipa S. B. F. OLIVEIRA, Paula FREIRE, Marta RODRIGUES, Ana RILO, Alphonse NAHON, Neide AREIA, Pedro COSTA, José L. BARROS</i>	



15	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE MICROBIOLÓGICA E IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SENSÍVEIS NO ESTUÁRIO DO MONDEGO	126
	<i>Ana Carla GARCIA, Bárbara CAMARÃO, Ana Cristina ROCHA</i>	
5	AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE AO GALGAMENTO DAS DUNAS NAS GARGANTAS NORTE E SUL DA PENINSULA DE MACANETA	136
	<i>André António JOSÉ, Nélio N.O SITÓE, Fialho. P. J. NEHAMA, Noca B. FURACA, José PINHO</i>	
12	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO DE MODELOS FÍSICOS DE VEGETAÇÃO NA ATENUAÇÃO DA ENERGIA DAS ONDAS: CONTRIBUTOS PARA SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA NA DEFESA COSTEIRA	57
	<i>Maria MENDES, José PINHO</i>	
11	CARATERIZAÇÃO DO CLIMA DE ONDAS E PERIGOS COSTEIROS DA CIDADE DA BEIRA. MOÇAMBIQUE	41
	<i>Rogério CUINHANE, José FERREIRA, Conceição FORTES, Rui CAPITÃO, Liliana PINHEIRO</i>	
51	CICLO URBANO DA ÁGUA E RESILIÊNCIA CLIMÁTICA EM GÂNDOLA, PORTUGAL - INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E SOCIAL ALINHADA COM A NATUREZA	118
	<i>Alvarina PINTO SERRANO, Vera SIMÕES, Manuela MOREIRA DA SILVA</i>	
43	CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE À EROÇÃO COSTEIRA COM APOIO MULTICRITÉRIO EM GRUPO: APLICAÇÃO DE UM NOVO MÉTODO EM MACEIÓ-AL	148
	<i>Maria Alyne dos Santos LIMA, Wesley Douglas Oliveira SILVA, Andressa Ellen APOLINÁRIO, Iago José de Lima SILVA</i>	
21	COCREATED FUTURE SCENARIOS FOR WETLAND HABITAT RESTORATION IN A COASTAL LAGOON: INTEGRATING PARTICIPATORY MAPPING AND THE INVEST BLUE CARBON MODEL	117
	<i>Lamara S. CAVALCANTE, Diógenes F. S. COSTA, Sebastian VILLASANTE, Ana I. SOUSA, João P. COELHO, Ana I. LILLEBØ</i>	
37	CONCEÇÃO DE UM ÍNDICE DE ADEQUABILIDADE PARA A AQUACULTURA OFFSHORE EM PORTUGAL	123
	<i>Bárbara PEIXOTO, Daniel CLEMENTE, Cristiana COSTA, Filipe MIRANDA, Tiago FERRADOSA, Paulo ROSA-SANTOS, Francisco TAVEIRA-PINTO</i>	
14	DA APLICAÇÃO NACIONAL À TRANSFERÊNCIA INTERNACIONAL: POTENCIAL DA FERRAMENTA COAST NA GESTÃO COSTEIRA EM PAÍSES CPLP	50
	<i>Márcia LIMA, Carlos COELHO</i>	
29	DAMAGE EVOLUTION IN THE HEAD SECTION OF A BREAKWATER	99
	<i>Rute LEMOS, Ana MENDONÇA, Conceição J.E.M. FORTES, Carolina MARTINEZ, Tiago LOPES, Lucas BRITO, Bruno PEREIRA, Helder Girão</i>	



58	DÉFICE SEDIMENTAR E EROSÃO COSTEIRA EM PORTUGAL: ENQUADRAMENTO E DESAFIOS DE GESTÃO	144
	<i>Sílvia NAVE, Pedro GONÇALVES</i>	
19	DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS DE MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA E MORFODINÂMICA PARA APOIO À PREVISÃO E ALERTA NO ESTUÁRIO DO RIO CÁVADO E ZONA COSTEIRA ADJACENTE.....	91
	<i>Miguel PEREIRA, José PINHO</i>	
17	EFEITO DO TRANSPORTE SEDIMENTAR EÓLICO EM ESTRUTURAS DE ACESSO A PRAIAS.....	32
	<i>Frederico ROMÃO, Fabiana CORREIA, Paulo SILVA, Márcia LIMA, Susana COSTAS, Carlos COELHO</i>	
47	ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR, SUBSIDÊNCIA DO SOLO, URBANIZAÇÃO, CHUVAS TORRENCIAIS: DESAFIOS PARA A SUSTENTABILIDADE DE RECIFE	46
	<i>Jaime J. S. P. CABRAL, Gastão C. FONSECA NETO, Marcos A. B. SILVA JUNIOR, Arivânia B. RODRIGUES, Wendson O. SOUZA</i>	
42	EVOLUÇÃO DA POSIÇÃO DA LINHA DE COSTA ENTRE O CABEDELO E A LEIROSA (FIGUEIRA DA FOZ) À ESCALA DE DÉCADAS	131
	<i>Paula FREIRE, Ana RILO, Filipa S. B. F. OLIVEIRA, Marta RODRIGUES, Alphonse NAHON, Neide AREIA, Pedro COSTA, Leandro BARROS</i>	
6	INFERRING TOPOGRAPHIC CHANGES IN INTERTIDAL FLATS OF THE SADO ESTUARY USING SENTINEL-2 IMAGERY.....	35
	<i>Matilde CORREIA, Carlos David SANTOS</i>	
40	INTEGRATING NUMERICAL MODELING AND MACHINE LEARNING FOR COASTAL FLOOD PREDICTION AND BREAKWATER LAYOUT OPTIMIZATION	105
	<i>Moeketsi DUIKER, Victor RAMOS, Jaime dos SANTOS CARDOSO, Francisco TAVEIRA-PINTO, Paulo ROSA-SANTOS</i>	
57	INTERVENÇÕES DE ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DE SEDIMENTOS: AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO MODELO IODA	29
	<i>Catarina CARVALHO, Ana Margarida FERREIRA, Carlos COELHO</i>	
24	INUNDAÇÕES COSTEIRAS SOB CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO RIO TEJIPIÓ, PERNAMBUCO (BRASIL)	154
	<i>Yuri Tomaz NEVES, Italo Roberto O. NÓBREGA, Lysanne Souza de MOURA, Amanda Machado PEREIRA, Daniele de Souza SANTOS, Gadadhara de Figueiredo FERRAZ, Jaime Joaquim da Silva Pereira CABRAL</i>	
45	MAPEAMENTO E ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA EM CONTEXTO INSULAR COM RECURSO A ÍNDICES MULTIESPECTRAIS: ESTUDO DE CASO NO ARQUIPÉLAGO DA MADEIRA	151
	<i>Ana Cristina Freitas GOMES, Romeu GERARDO, Isabel Pedroso de LIMA</i>	



44	MAPEAMENTO SEMIAUTOMÁTICO DE TSS COM IMAGENS SENTINEL-2 APLICADO A ESTUDOS COSTEIROS	141
	<i>Pedro GONÇALVES, Sílvia NAVE</i>	
16	MEDIUM-TERM MORPHOLOGICAL EVOLUTION OF THE DOURO SAND SPIT FOLLOWING BREAKWATER CONSTRUCTION.....	26
	<i>Mahmoud ABOUHALIMA, Luciana das NEVES, Hugo LOPES, Francisco TAVEIRA-PINTO, Paulo ROSA-SANTOS</i>	
25	MODELAÇÃO DO POTENCIAL DE ATENUAÇÃO DA ENERGIA DAS ONDAS POR UM SISTEMA DE AQUACULTURA	60
	<i>Filipe MIRANDA, Rui COSTA-ANTUNES, Paulo ROSA-SANTOS, Francisco TAVEIRA-PINTO, Tiago FAZERES-FERRADOSA</i>	
26	MODELLING MANGROVE COASTAL PROTECTION UNDER SEA-LEVEL RISE IN THE MACUSE ESTUARY	134
	<i>Nélio SITOE, José PINHO</i>	
7	MONITORIZAR PARA ANTECIPAR: DA OBSERVAÇÃO COSTEIRA À INTELIGÊNCIA TERRITORIAL	71
	<i>José Luís PINHO, Helena GRANJA</i>	
1	MULTI-SCALE ASSESSMENT OF ECOSYSTEM SERVICES UNDER CLIMATE AND ANTHROPOGENIC PRESSURES ALONG THE NORTH WEST COAST OF PORTUGAL	114
	<i>Jacinto CUNHA, Edna CABECINHA, Sebastian VILLASANTE, Stefano BALBI, Michael ELLIOTT, Sandra RAMOS</i>	
27	NOVAS TECNOLOGIAS NA MONITORIZAÇÃO E GESTÃO DE SISTEMAS AQUÁTICOS: DIGITALIZAÇÃO E ROBÓTICA DE ENXAME	74
	<i>Ana BIO, Isabel IGLESIAS, Rodrigo OZÓRIO, Francisco ARENAS, Rui ROCHA, Gonçalo FERREIRA, Micael S. COUCEIRO</i>	
56	ONDE COMEÇA O MAR? GOVERNANÇA E PLANEAMENTO DO CONTÍNUO TERRA-MAR EM PORTUGAL	18
	<i>Nicolás SANTELICES ARTAZA & Paulo CONCEIÇÃO</i>	
55	OS CURSOS TÉCNICOS DE DRAGAGENS COMO PLATAFORMA DE TRANSFERÊNCIA DE CONHECIMENTO PARA A GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS	111
	<i>Maria Manuel CRUZ, Carlos COELHO, José L. CACHO, Luís M. PINHEIRO, Márcia LIMA, Paulo A. SILVA, Rui PAIVA</i>	
41	POLÍTICAS PÚBLICAS E GOVERNAÇÃO DO RISCO COSTEIRO: A JUSTIÇA CLIMÁTICA NO PLANEAMENTO TERRITORIAL DO MUNICÍPIO DE OVAR.	20
	<i>Pedro Seixas SILVA, Myriam LOPES, Peter ROEBELING</i>	



3	PORTUGAL LITORÂNEO: MUDANÇAS COSTEIRAS, POLÍTICAS E SOCIAIS	69
	<i>Luisa SCHMIDT, Pedro PRISTA</i>	
20	PRAIA DA VITÓRIA: DESEMPENHO DO SISTEMA HIDRALERTA	86
	<i>Conceição FORTES, Liliana PINHEIRO, Catarina ZÓZIMO, Larize LIMA, Mauro MACIEL, Sofia GOULART</i>	
54	PRELIMINARY ASSESSMENT OF THE BEHAVIOUR OF MATTRESSES AND ROCK DUMPING FOR SUBMARINE CABLE PROTECTION AT THE PORTUGUESE COAST.....	102
	<i>Suha IBRAHIM, Filipe MIRANDA, Tiago FERRADOSA, Francisco TAVEIRA-PINTO, Paulo ROSA-SANTOS</i>	
18	RESILIÊNCIA CLIMÁTICA DO SETOR ENERGÉTICO NA GUINÉ-BISSAU: O CONTEXTO DA INUNDAÇÃO E DA EROSÃO NUMA ABORDAGEM MULTIRRISCO	43
	<i>Luciana das Neves, Hilario CASTRO LARA, Els VAN UYTVEN, Florian SPARAVIER</i>	
34	REVISITAR AS RECOMENDAÇÕES DO PROJETO EUROSION E INDICADORES ATUAIS NA EUROPA.....	13
	<i>Francisco TAVEIRA PINTO, Luciana das NEVES</i>	
2	SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA PARA PROMOVER A RESILIÊNCIA COSTEIRA: UM ESTUDO DE CASO NO NORTE DE PORTUGAL	53
	<i>Carla ROLO ANTUNES, Miguel AZEVEDO COUTINHO</i>	
23	UTILIZAÇÃO DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA REMOTA NA SELEÇÃO DAS ÁREAS MAIS ADEQUADAS PARA A PRODUÇÃO DE MACROALGAS NA COSTA PORTUGUESA: SACCHARINA LATISSIMA	94
	<i>Luís RESENDE, João M. NETO, Zara TEIXEIRA, Ana GARCIA, Margarida H. MATIAS</i>	





XII CPGZC