



## EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA EM TRÊS REGIÕES DE ELEVADO RISCO À EROÇÃO NO LITORAL PORTUGUÊS

Blanca Mendiguren\*, Rita Pombo\*, Carlos Coelho\*

\*RISCO e Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 3810-193, Portugal.

[blancamg@ua.pt](mailto:blancamg@ua.pt), [ritanovo@ua.pt](mailto:ritanovo@ua.pt), [ccoelho@ua.pt](mailto:ccoelho@ua.pt)

### Resumo

Nas últimas décadas a extensa faixa do litoral continental português tem verificado um crescimento significativo na pressão exercida sobre o ambiente costeiro, associada à diminuição da contribuição sedimentar, acompanhada da ocorrência de eventos com elevada energia e a consequente tendência regressiva da posição da linha de costa. Neste contexto, decidiu-se aplicar o modelo numérico LTC, *Long-term Configuration* (Coelho, 2005) a três áreas costeiras em risco de erosão, para avaliar o comportamento da linha de costa, em projeções a 20 anos. Os três locais de estudo localizam-se na costa continental oeste, correspondendo aos trechos: São Jacinto-Gafanha da Boa Hora; Cabo Mondego-Leirosa; Cova do Vapor-Fonte da Telha. Os resultados permitiram identificar uma tendência regressiva da posição da linha de costa nos três trechos, com exceção na praia da Claridade (Figueira da Foz), onde se verifica uma tendência de acreção. É na região costeira compreendida entre a Costa Nova e a Vagueira que se verifica a projeção da maior taxa média de recuo da posição da linha de costa: 9.08 m/ano, associada a uma perda de  $4.2 \times 10^5$  m<sup>2</sup> de território.

### Introdução

Um dos ambientes mais dinâmicos e frágeis da zona costeira são as costas arenosas. Estes ambientes são altamente afetados pela erosão, que resulta da combinação de fatores naturais (disponibilidade sedimentar e clima de agitação marítima) e antrópicos (EUrosion, 2006). Mais do 50% da costa arenosa portuguesa está sob um significativo retrocesso da linha de costa (Pranzini *et al.*, 2015). A costa ocidental está exposta à ondulação gerada no Atlântico Norte, sendo esta bastante energética, verificando-se que os temporais que assolam a costa provocam grandes alterações na morfodinâmica das praias, intensificando a velocidade da corrente de deriva litoral (Romão *et al.*, 2015). A construção de barragens hidroelétricas acarreta efeitos adversos no abastecimento de sedimentos fluviais que alimentam as áreas costeiras (Syvitski *et al.*, 2009), estimando-se uma retenção de mais de 80% dos volumes de areias que eram transportadas pelos rios em regime natural (Valle, 2014). Nas últimas décadas, num esforço por reduzir os efeitos da erosão ao longo das áreas costeiras, a ação antropogénica tem ganhado peso no litoral continental português. Com o fim de adicionar sedimentos às áreas costeiras, as alimentações artificiais começaram a ser planeadas na década de 1950 (Pranzini *et al.*, 2015). Devido aos problemas de erosão costeira, 14% da linha costeira portuguesa está defendida por estruturas artificiais, incluindo esporões, quebra-mares e revestimentos longitudinais, o que totaliza cerca de 140 km da costa (Santos e Miranda, 2006). As defesas costeiras transversais atuam como intercetores do transporte longitudinal sedimentar (Stronkhorst *et al.*, 2018), e no final da década de 1980, podia-se observar uma densidade de 2 esporões/km na costa noroeste do país, entre Espinho e Cortegaça (Dias, 1990).

A evolução da posição da linha de costa ao longo do litoral continental português durante o período compreendido entre 1958 e 2010, evidencia uma tendência global de erosão das costas arenosas, com uma taxa média de  $0.24 \pm 0.01$  m/ano. As maiores taxas de erosão localizaram-se nos trechos de Espinho-Torreira, Costa Nova-Praia de Mira ( $7.38 \pm 0.2$  m/ano), Cova da Gala-Leirosa ( $3.77 \pm 0.2$  m/ano) e Costa do Vapor-Costa da Caparica ( $4.57 \pm 0.2$  m/ano) (Lira *et al.*, 2016). Neste sentido, o principal objetivo do presente trabalho foca-se na projeção da posição da linha de costa, num horizonte temporal de 20 anos, em três trechos de alto risco à erosão costeira do litoral continental português (Figura 1): na zona de Aveiro, o trecho compreendido entre São Jacinto e a Gafanha da Boa Hora; na zona da Figueira da Foz, o trecho compreendido entre o Cabo Mondego e a Leirosa; e na zona a Sul de Lisboa, o trecho entre a Cova do Vapor



e a Fonte da Telha. Apresenta-se também a caracterização física da área de estudo, incluindo a definição dos agentes forçadores (a agitação marítima) e a caracterização das taxas de transporte sedimentar. Para a simulação da posição da linha de costa, optou-se por utilizar o modelo numérico LTC (Coelho, 2005), devido à sua capacidade de reproduzir e projetar a linha de costa a médio-longo prazo, com base na equação de continuidade aplicada ao transporte sedimentar.

## Metodologia

### Caracterização Física da Área de Estudo

Os três locais de estudo (São Jacinto-Gafanha da Boa Hora; Cabo Mondego-Leirosa; Cova do Vapor-Fonte da Telha) são caracterizados pela presença de praias arenosas e obras de proteção costeira. As estruturas de defesa costeira naturais e artificiais foram identificadas, sendo que condicionam a evolução natural da posição da linha de costa. Considera-se que os esporões criam barreiras transversais ao transporte sedimentar longilitoral, as obras aderentes fixam a posição da linha de costa impedindo o recuo para além da sua linha de implantação e, as zonas rochosas funcionam como fronteiras fixas para efeitos de modelação. Foram preparados 4 domínios de cálculo (malhas), tendo como referência a localização das fronteiras identificadas. As malhas são compostas por uma grelha regular de pontos espaçados de 20 m no eixo X (direção Este-Oeste) e 40 m no eixo Y (direção Norte-Sul), e estendem-se sensivelmente entre as cotas -25 m e +25 m (ZH), conforme indicado na Tabela 1.

A malha M1 estende-se desde o limite Sul da praia de São Jacinto (delimitada a Norte pelo molhe Norte do Porto de Aveiro) até à Gafanha da Boa Hora (delimitada a Sul pelo esporão do Labrego). O segundo trecho costeiro é composto por duas malhas. A malha M2 estende-se desde a praia do Cabo Mondego (delimitada a Norte pelo afloramento rochoso) até à praia da Figueira da Foz (delimitada a Sul pelo molhe Sul do Porto da Figueira da Foz), tendo sido definida em separado da malha seguinte por representar um comportamento específico de baía. A malha M3 sobrepõe-se em 480 m à malha anterior M2 para garantir a continuidade de representação dos processos morfológicos (sendo delimitada a Norte pelo molhe Norte do Porto da Figueira da Foz), estendendo-se até à Leirosa (até 920 m a Sul do esporão, completando uma extensão total desta malha igual a 11 km). A malha M4 estende-se desde a Cova do Vapor (delimitada a Norte pelo molhe de abrigo de embarcações de pesca) até à Fonte da Telha (onde não existem estruturas transversais). A Figura 1 esquematiza a localização destas malhas.

Tabela 1. Caracterização dos domínios de cálculo criados para cada trecho.

Trecho costeiro	Malha	Coordenadas na origem		Nº. Total de pontos		Dimensão (km)	
		X	Y	X	Y	X	Y
S. Jacinto - Gaf. Boa Hora	M1	-60 207.6224	97 987.3492	451	276	9	11
Cabo Mondego - Fig. Foz	M2	-69 167.6224	52 987.3492	351	76	7	3
Fig. Foz - Leirosa	M3	-71 247.6224	42 467.3492	501	276	10	11
Cova Vapor - Fonte Telha	M4	-10 7964.8379	-12 3760.4222	851	326	17	13

Com o fim de avaliar os comportamentos localizados entre os pontos fixos representados no modelo, as malhas subdividiram-se em diferentes setores, também coincidentes com pontos fixos do modelo, designados por  $s_x$  (representando o  $x$  o número de ordem de cada sector dentro da malha), conforme se ilustra na Figura 1. A posição da linha de costa inicial do modelo foi determinada com referência ao nível médio do mar (+2m ZH), para cada domínio de cálculo, com base na informação do *Google Satellite* avaliada no software QGIS. Os ortofotomapas que representam esta informação são de 18/06/2018 para as malhas M1, M2 e M3 e de 03/10/2018 para a malha M4. A definição das taxas de variação da posição da linha de costa ao longo do tempo, para calibração do modelo, teve por base a análise da posição da linha de costa em períodos passados (linhas fisiográficas históricas), tendo como referência principal o estudo de

Lira *et al.* (2016). Na Figura 1 ilustra-se a posição da linha de costa inicial, traçada a preto, e as taxas de evolução entre 1958 e 2010, em transeptos afastados de 250m, com valor referente à escala de cores da legenda.

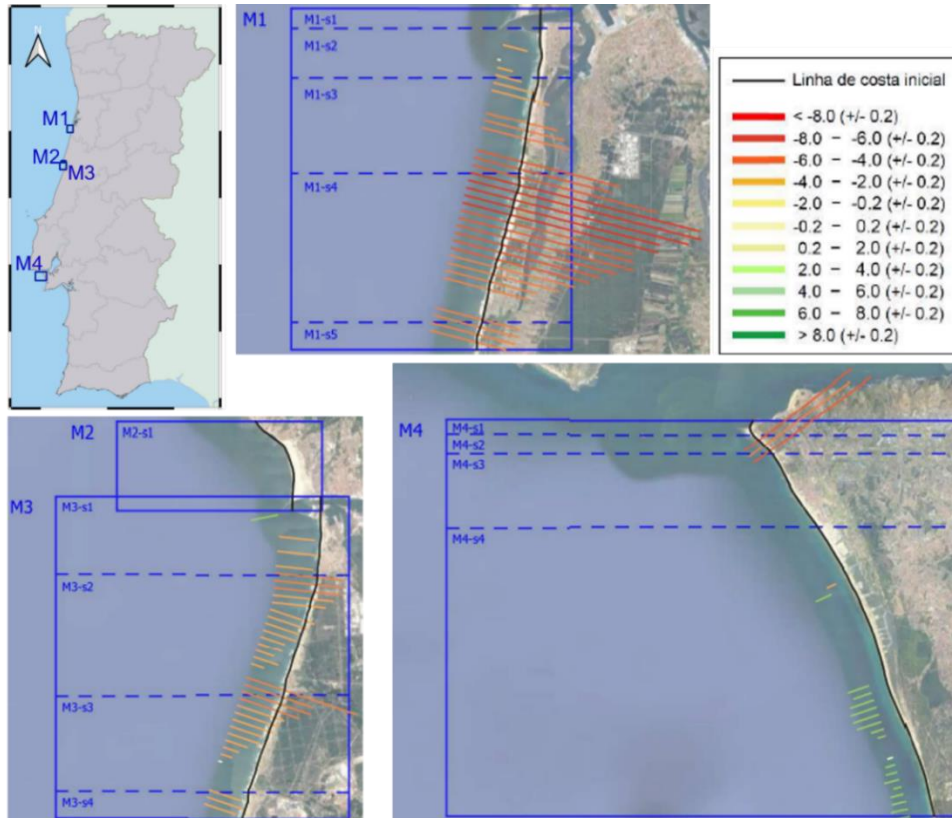


Figura 1. Localização das malhas e divisão dos sectores modelados. Taxas de variação da posição da linha de costa (m/ano) entre 1958 e 2010 (baseado em Lira *et al.*, 2016).

Na definição da batimetria, foram considerados um total de 6 perfis transversais obtidos no âmbito do Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental (COSMO), da Agência Portuguesa do Ambiente (COSMO, 2021). Para efeitos de modelação, os perfis do COSMO foram aproximados aos respetivos perfis de equilíbrio de Dean (1977) que melhor aproximam a batimetria real, sendo que estes se baseiam no pressuposto de dissipação uniforme da energia das ondas e que a sua fórmula geral é dada por:

$$h = Ax^m \quad \text{Eq. 1}$$

onde  $h$  representa a profundidade à distância  $x$ , medida desde a posição da linha de costa, em nível médio. No entanto, o expoente  $m$  pode tomar diferentes valores em função do tipo de dissipação da energia da agitação incidente na praia em análise (Coelho, 2005). Geralmente, para praias intermédias (características da generalidade da costa oeste portuguesa), as propostas variam entre  $m=1/2$ ,  $m=4/7$  e  $m=2/3$ , valor este que se generalizou e que foi adotado.

Desta forma, para estimativa da batimetria, considerou-se o perfil de equilíbrio de Dean (1977) representativo do perfil batimétrico real do trecho, assumindo que: i) no caso de haver mais que um perfil COSMO no trecho (malha M1 e M4), foi considerada a média dos perfis de Dean aproximados a cada perfil real; ii) no caso de existir apenas um perfil COSMO no trecho (malha M2 e M3), foi considerado apenas esse levantamento na aproximação a Dean. Os valores resultantes para o parâmetro  $A$  para as malhas M1, M2, M3 e M4 foram 0.090, 0.097, 0.084 e 0.058 respetivamente. Para estimativa da topografia, por questões de simplificação do modelo foi considerado um declive representativo e constante de 3%, definido a partir da linha de costa.



Os modelos topo-hidrográficos foram produzidos com base na posição da linha de costa e do perfil transversal de referência.

### *Agentes Forçadores*

Em relação aos agentes forçadores do modelo, na caracterização do regime de agitação marítima, realizou-se uma análise comparativa dos dados da boia ondógrafo de Leixões e dos dados provenientes do modelo espectral de previsão (*hindcast*) WAVEWATCH III™, cujos resultados foram objeto de validação (Dodet *et al.*, 2010). Estes últimos são disponibilizados pelo projeto MICORE e podem ser acedidos em GeoFCUL (2021). A análise realizou-se com base nos principais parâmetros da agitação: altura significativa da onda ( $H_s$ ), período de pico da onda ( $T_p$ ) e direção de pico da onda ( $D_p$ ). Dada a escassez e falta de continuidade dos registos de boia, decidiu-se avançar com a série do modelo WAVEWATCH III, por ser representativa das condições de agitação próximas na área de estudo, constituindo uma sequência de cerca de 56 anos de dados que reconstituem o clima ocorrido entre 01/01/1953 e 31/03/2009.

Finalmente, na caracterização das taxas de transporte sedimentar, foram consultados os resultados do Grupo de Trabalho para o Litoral (GTL, 2014). Os trechos costeiros São Jacinto-Gafanha da Boa Hora e Cabo Mondego-Leirosa encontram-se sujeitos a um clima de agitação fortemente energético, que em combinação com uma orientação NNW-SSE a NNE-SSW se traduz por um potencial do transporte sólido residual com magnitude da ordem de  $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ . Especificamente, a deriva litoral a Sul do paralelo de Espinho é estimada em  $1.1 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ , devido à contribuição do rio Douro (GTL, 2014). O trecho Cova do Vapor-Cornélia apresenta um padrão de transporte em que a direção da deriva litoral resultante converge para o estuário exterior do Tejo. No trecho da Caparica, os comportamentos da dinâmica sedimentar são complexos e difíceis de reproduzir, existindo diversos estudos de monitorização e modelação (e.g., Tabora *et al.*, 2014; Pinto *et al.*, 2015) que demonstram a necessidade de adotar estratégias de modelação que considerem explicitamente as relações retroativas entre a evolução da faixa costeira e o forçamento oceanográfico. Na inexistência de um valor genérico para caracterizar o transporte na célula sedimentar, o processo de calibração do modelo numérico incorpora uma análise combinada e crítica dos comportamentos de transporte sedimentar e taxas de variação da posição da linha de costa.

### *Calibração do Modelo Numérico*

O modelo LTC, *Long-term Configuration* (Coelho, 2005), permite fazer projeções da posição da linha de costa em zonas costeiras arenosas e admite o estabelecimento de cenários naturais e antropogénicos, sendo baseado nos pressupostos dos modelos de '1-linha'. Para efeitos de calibração do modelo LTC, foram simulados os últimos 50 anos completos da série *hindcast* produzida pelo modelo WAVEWATCH III (1959-2008). Para tal, foi admitido um nível de mar constante e igual ao nível médio, considerado +2.00 m ZH. O modelo assume a incidência individual das ondas durante o tempo computacional e, para cada onda é estimado o transporte sólido longitudinal induzido, fazendo-se um balanço sedimentar, em cada trecho elementar da praia, e avaliando qual o volume de sedimentos em erosão ou acreção (Lima e Coelho, 2017).

Os resultados desta simulação foram comparados com os resultados da evolução da posição da linha de costa no período 1958-2010 determinados por Lira *et al.* (2016). Denota-se que os resultados da modelação nos setores M1-s1, M1-s5, M3-s4, M4-s1 e M4-s3 não foram considerados, ou porque são essencialmente artificializados com obras longitudinais aderentes, ou porque representam setores de fronteira, tendo sido considerados apenas para estabilidade do modelo. A calibração do modelo aplicada aos diversos setores foi essencialmente determinada pela discussão do valor da profundidade de fecho ( $H_sC$ ) e do coeficiente empírico de proporcionalidade na fórmula de CERC ( $K_{CERC}$ ). Os valores de  $K_{CERC}$  foram definidos de forma a que os resultados se aproximem das taxas de variação da posição da linha de costa de Lira *et al.* (2016).  $H_sC$  é uma variável dependente de  $H_s$ , tendo sido considerada a maior altura significativa de onda, 10.08m, da série WAVEWATCHIII no período de estudo, o valor de 8.00m, ou um valor variável ao longo do cálculo, como forma de calibração. Desta forma, conseguiu-se conciliar uma coerência nos valores de calibração a 50 anos nos setores M1-s2, M1-s3, M2-s1, M3-s1, M4-s2 e M4-s4, conforme a Tabela 2.





Tabela 2. Parâmetros da calibração do modelo LTC, para cada setor, no período 1959-2008.

Setor	Local	Taxa média (m/ano)	Varição máxima (m/ano)	HsC	k <sub>CERC</sub>	Δ <sub>abs</sub> (m/ano)	Δ <sub>rel</sub> (%)
M1-s2	Barra	-0.33	-0.71	10.08	0.0320	-0.03	5
M1-s3	Barra-Costa Nova	-2.69	-6.06	8.00	0.0690	0.15	6
M1-s4	Costa Nova - Vagueira	-5.14	-8.41	*	0.0810	-0.07	1
M2-s1	Figueira da Foz	2.14	4.47	10.08	0.0090	**	**
M3-s1	Figueira da Foz - Cova Gala	-1.23	-1.72	10.08	0.0187	-0.01	1
M3-s2	Cova Gala - Costa de Lavos	-1.31	-6.73	*	0.0226	-0.03	2
M3-s3	Costa de Lavos - Leirosa	-1.19	-6.14	*	0.0158	-0.05	4
M4-s2	Praia de São João	-4.25	-6.96	10.08	0.0700	-0.01	0
M4-s4	Praia da Saúde - Fonte da telha	-0.24	-0.65	10.08	0.0100	-0.02	8

\* Valores calculados pelo modelo para cada onda com base na *Hs*. \*\* Não existem valores no trabalho de Lira *et al.* (2016) para este setor.

Os resultados da calibração atenderam prioritariamente às taxas de variação da posição da linha de costa em prejuízo das taxas de transporte sedimentar, devido à dificuldade de considerar simultaneamente a representação adequada destes dois parâmetros. Os valores Δ<sub>abs</sub> e Δ<sub>rel</sub> na Tabela 2 representam, respetivamente, a diferença absoluta e relativa entre as taxas médias de variação da posição da linha de costa obtidas no modelo LTC e as registadas por Lira *et al.* (2016). Na calibração, a avaliação das taxas médias de variação da posição da linha de costa, teve em consideração a área em erosão (ou acreção, no caso da Figueira da Foz, setor M2-s1) imediatamente a sotamar dos pontos fixos que definem o limite Norte de cada setor.

### Projeção da Posição da Linha da Costa, a 20 Anos

Na definição da posição da linha da costa, na projeção a 20 anos, considerou-se a manutenção das obras existentes (espórões, molhes e obras longitudinais aderentes), sem a incorporação de outras intervenções antropogénicas (alimentações artificiais, bypass, etc.). Com o objetivo de simular a posição da linha da costa no período de 20 anos, consideraram-se os dados de agitação marítima do período 1989-2008 da série WAVEWATCH III.

#### Análise Anual da Variação da Posição da Linha de Costa

Os resultados da projeção da posição da linha de costa foram analisados anualmente, mediante a medição das áreas perdidas e ganhas, em relação à linha de costa inicial, por aplicação do software QGIS. Áreas menores a 1 m<sup>2</sup> não foram consideradas na análise, por não serem representativas no cômputo global. A análise dos processos de acreção e erosão anual de cada setor, permitiu identificar as tendências na projeção a 20 anos (ver Figura 2).

Pode-se observar que nos três trechos em estudo, há uma tendência de erosão superior à de acreção. A ordem de grandeza difere entre os gráficos das três áreas na Figura 2, pelo que é possível inferir da análise visual dos resultados que o setor com o maior risco de erosão localiza-se no trecho de S. Jacinto-Gafanha da Boa Hora, seguido dos setores do trecho Figueira da Foz-Leirosa. No sector M1-s4, localizado entre a Costa Nova e a Vagueira, verifica-se um ajuste inicial do modelo com um pico de acreção no primeiro ano de simulação, que se vai diluindo ao longo do tempo. O setor M1-s2 apresenta um baixo risco de erosão no trecho costeiro em estudo, onde os sectores M1-s3 e M1-s4 apresentam uma tendência erosiva mais significativa. O setor M2-s1 (praia da Claridade, Figueira da Foz), apresenta uma tendência de acreção progressiva no tempo, e a inexistência de valores representativos de erosão.

No trecho entre a Figueira da Foz e a Leirosa, destacam-se na análise anual os setores M3-s2 e M3-s3 que mostraram alterações nas áreas de acreção entre os anos 0 e 4 e os anos 9 e 20 de simulação. O setor M3-s1 não exhibe padrões de acreção relevantes, sendo que se observa uma tendência progressiva de erosão no tempo. Os setores M3-s2 e M3-s3 apresentam um comportamento similar de acreção ao longo do tempo.

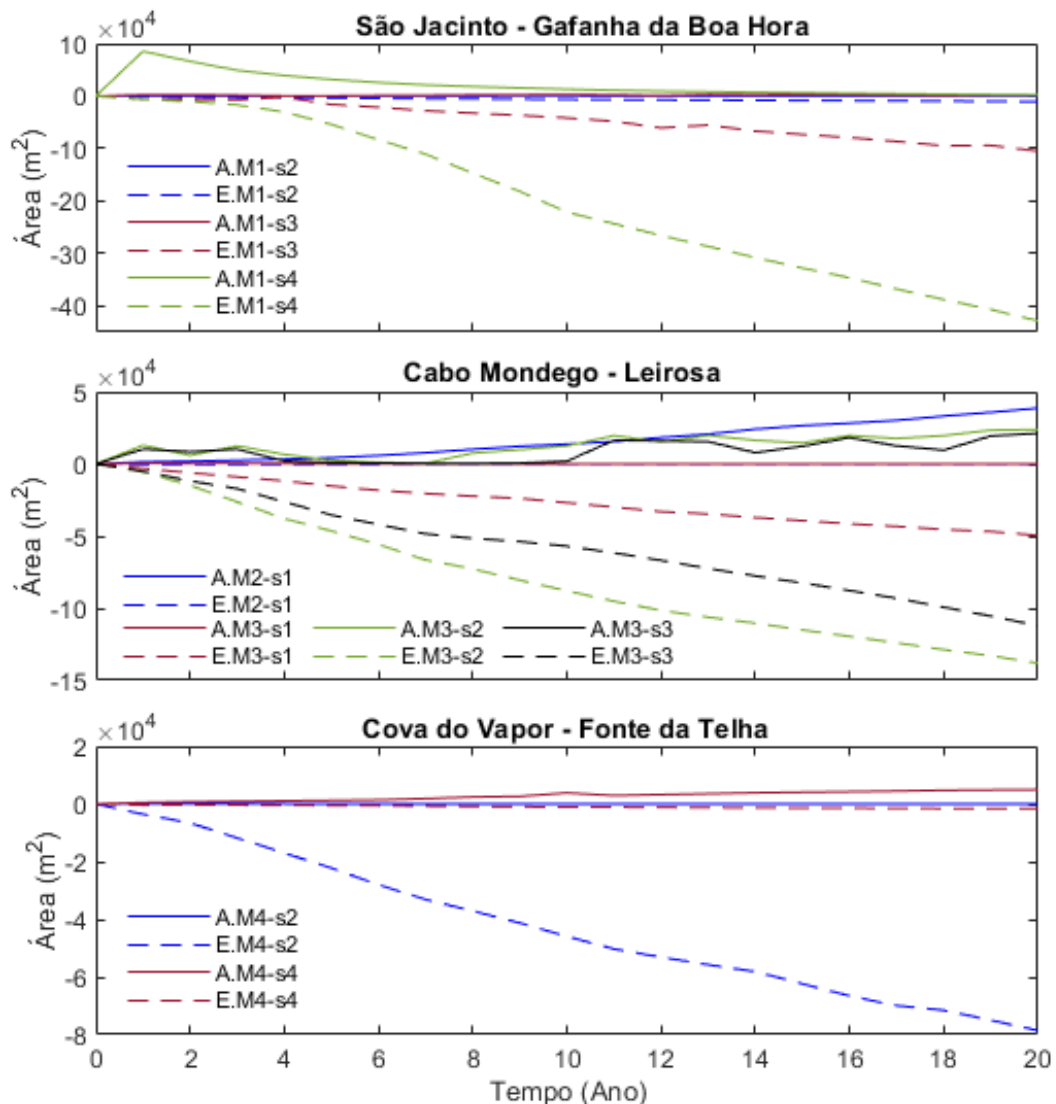


Figura 2. Áreas anuais em erosão (E.) e acreção (A.) dos setores em estudo, nos 20 anos de projeção. As linhas contínuas representam acreção e as linhas tracejadas erosão.

No trecho costeiro compreendido entre a Cova do Vapor e a Fonte da Telha (M4-s4), identifica-se uma tendência gradual de ligeira acreção e, uma progressão erosiva no setor no setor M4-s2. A maior erosão foi localizada no setor que representa a praia de São João.

#### Análise da Projeção da Linha de Costa no Ano 20

Na avaliação das taxas médias de variação da posição da linha de costa, tiveram-se em consideração a área em erosão ou acreção imediatamente a sotamar dos pontos fixos que definem o limite Norte de cada sector e a área total em erosão ou acreção no sector em estudo. A variação máxima da posição da linha de costa foi avaliada para cada sector. Na Tabela 3 apresentam-se os valores de acreção e erosão no final dos 20 anos de simulação, bem como os valores da variação média e máxima para cada sector em estudo. A localização das áreas em erosão e acreção, na projeção da linha de costa no ano 20, é representada na Figura 3.

No trecho compreendido entre a Barra e a Vagueira, observou-se uma tendência erosiva predominante ao longo dos três setores (Figura 2). Na praia da Barra, observam-se duas regiões de erosão (ver Figura 3): a primeira, a Sul do molhe Sul do Porto de Aveiro e, a segunda, a Norte do primeiro esporão da Costa Nova. Estas duas regiões de erosão representam uma perda de

território de  $1.06 \times 10^4 \text{ m}^2$  e, são separadas por uma pequena área de acreção de  $215 \text{ m}^2$ , localizada no centro da praia da Barra. A taxa média de erosão neste setor correspondente a  $0.84 \text{ m/ano}$ , na zona Norte do setor (designado por sotamar na Tabela 3), valor que supera os  $0.33 \text{ m/ano}$  observados na análise da taxa média de recuo no setor. Prevê-se que a variação máxima da posição da linha de costa atinja os  $0.87 \text{ m/ano}$ , na projeção a 20 anos.

Tabela 3. Resultados da variação da posição da linha de costa na projeção a 20 anos.

Setor	Local	Erosão (m <sup>2</sup> )	Acreção (m <sup>2</sup> )	Taxa média (m/ano)		Variação máxima (m/ano)
				Sotamar	Setor	
M1-s2	Barra	10593	215	-0.84	-0.33	-0.87
M1-s3	Barra-Costa Nova	105053	1595	-5.07	-1.71	-7.03
M1-s4	Costa Nova - Vagueira	428516	2385	-9.08	-4.46	-16.68
M2-s1	Figueira da Foz	204	38715	+0.95	+0.65	+4.09
M3-s1	Figueira da Foz - Cova Gala	49587	0	-2.68	-0.93	-2.82
M3-s2	Cova Gala - Costa de Lavos	38208	23794	-0.54	-0.46	-6.41
M3-s3	Costa de Lavos - Leirosa	112173	21241	-1.65	-1.71	-4.19
M4-s2	Praia de São João	78554	0	-6.14	-6.14	-7.25
M4-s4	Praia da Saúde - Fonte da Telha	1625	4963	+0.10	+0.03	-0.13

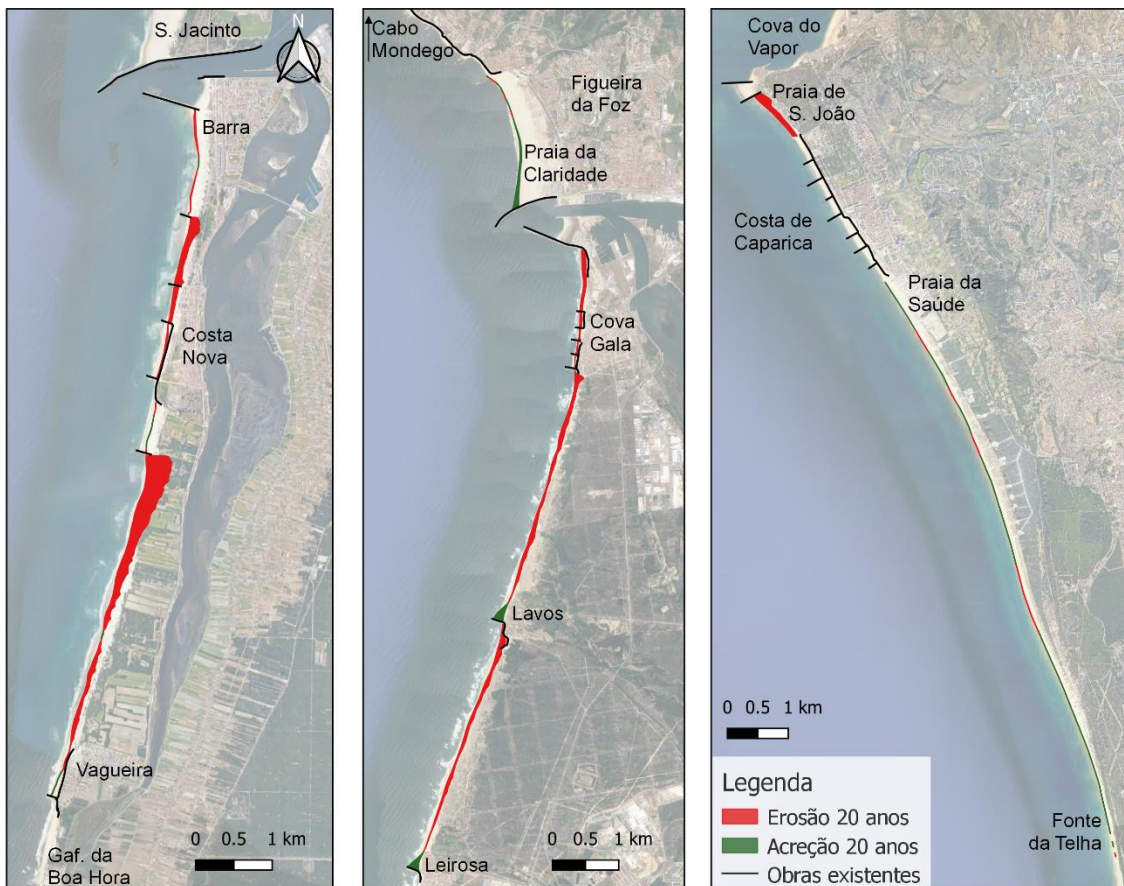


Figura 3. Áreas de erosão (vermelho) e acreção (verde) na projeção para o ano 20. As obras de proteção costeira existentes estão representadas com uma linha preta contínua.



O setor que representa a troço costeiro entre a Barra e Costa Nova, apresenta atualmente um total de 5 esporões e, duas obras longitudinais aderentes (ver Figura 3): a primeira entre os esporões 3 e 4 (de Norte para Sul) e; a segunda, a Sul do esporão 4. O troço costeiro que apresenta a maior erosão neste setor localiza-se a sotamar do primeiro esporão, onde ocorre uma perda de território de  $1.05 \times 10^5$  m<sup>2</sup>. Observa-se o mesmo comportamento nas praias a Sul dos esporões 2 e 3, sendo que o efeito da erosão se vê reduzido nesta última devido à presença da obra longitudinal aderente. A única área de acreção deste setor localiza-se a Norte do esporão 5, com um valor de 1595 m<sup>2</sup>. Na parte Norte do setor Barra-Costa Nova (sotamar) prevê-se uma taxa média de recuo da posição da linha de costa de 5.07 m/ano, enquanto em todo o setor de reduz para uma média de 1.71 m/ano. A variação máxima projetada neste setor atingirá os 7.03 m/ano.

A Sul do 5º esporão, no setor Costa Nova-Vagueira, prevê-se que nos próximos 20 anos haja uma erosão da ordem de  $4.28 \times 10^5$  m<sup>2</sup>, a maior área em erosão identificada neste estudo. Esta área estende-se desde o Sul do esporão 5 da Costa Nova, até a obra longitudinal aderente a Norte de Vagueira, sendo mais proeminente na zona mais a Norte do setor analisado (ver Figura 3). Também é neste setor que se verifica a maior taxa média de recuo da posição da linha de costa, 9.08 m/ano, na avaliação a sotamar (ver Tabela 3). No entanto, na análise da taxa média por setor, observa-se um recuo de 4.46 m/ano. Estima-se que a variação máxima calculada na projeção a 20 anos atinja os 16.68 m/ano.

No trecho costeiro entre o Cabo Mondego e Figueira da Foz, setor M2-s1, observam-se áreas alternadas de deposição e erosão a Sul do cabo, sendo prevista uma acreção de  $3.8 \times 10^4$  m<sup>2</sup> na praia da Claridade (ver Figura 3). Prevê-se ainda uma deposição média de sedimentos de 0.65 m/ano, na análise do setor com um máximo localizado de 4.09 m/ano.

A Sul do quebramar Sul do porto de Figueira da Foz, no setor entre a Figueira da Foz e a Cova Gala, espera-se uma erosão de  $4.9 \times 10^4$  m<sup>2</sup> e uma taxa média de erosão de 0.93 m/ano. O troço costeiro que se desenvolve desde o último esporão da Cova Gala até ao esporão da Costa de Lavos, apresenta uma área de erosão de  $3.8 \times 10^4$  m<sup>2</sup>, que abrange a maior parte do troço costeiro, seguida de uma área de  $2.4 \times 10^4$  m<sup>2</sup> de acreção localizada a Norte do esporão de Lavos. Antecipa-se uma taxa média de erosão de 0.54 m/ano (sotamar) e 0.46 m/ano (em todo o setor) na projeção a 20 anos do comportamento costeiro. Na análise da variação da posição da linha de costa, identificou-se uma variação máxima na projeção de 7.41 m/ano de acreção, mas a Tabela 3 realça a máxima taxa de erosão, que corresponde ao valor de 6.41 m/ano.

A maior erosão verificada no trecho costeiro da malha M3, foi no setor compreendido entre a Costa de Lavos e a Leirosa, com uma área de  $11.2 \times 10^4$  m<sup>2</sup>, que se estende desde o Sul da obra longitudinal aderente de Lavos até uma área de deposição de sedimentos de  $2.1 \times 10^4$  m<sup>2</sup>, localizada a Norte do esporão da Leirosa (ver Figura 3). Neste setor, calcularam-se taxas médias de erosão, na projeção a 20 anos, de 1.65 e 1.71 m/ano, respetivamente na avaliação a sotamar e no setor. As variações máximas da posição da linha de costa mostraram um comportamento análogo ao setor M3-s2, com uma variação de 4.19 m/ano de erosão, mas tendo também uma zona de 7.80 m/ano de acreção (Tabela 3).

A praia de São João, representada pelo setor M4-s2, é protegida a Norte por um esporão e a Sul por uma obra longitudinal aderente. Neste setor, na projeção do comportamento para os próximos 20 anos, espera-se um recuo da posição da linha de costa associada a uma perda de  $7.86 \times 10^4$  m<sup>2</sup> de território e, prevê-se uma taxa média de erosão de 6.14 m/ano (ver Figura 3). Na análise da variação da posição da linha de costa, identificou-se uma erosão máxima de 7.25 m/ano na projeção a 20 anos. A Sul do campo de esporões da Costa de Caparica, entre a Praia da Saúde e a Fonte da Telha, observaram-se regiões alternadas de acreção e erosão ao longo do setor, representando respetivamente 4963 m<sup>2</sup> e 1625 m<sup>2</sup> (ver Figura 3). Neste setor, calcularam-se taxas médias de acreção de 0.10 e 0.03 m/ano respetivamente a sotamar e no setor, na análise da projeção a 20 anos.





## Discussão

O estudo do comportamento da posição da linha de costa no horizonte temporal de 20 anos, avaliou anualmente as áreas previstas de erosão e acreção em três trechos de alto risco à erosão, na costa continental portuguesa. A projeção da posição da linha de costa foi desenvolvida com a aplicação do modelo numérico LTC (Coelho, 2005), calibrado com base nos registos históricos descritos por Lira *et al.* (2016). Os resultados médios anuais obtidos com as condições de modelação descritas ao longo deste trabalho, aproximam-se de forma bastante satisfatória dos observados no passado, nomeadamente no período de comparação 1958-2010 (53 anos). Em termos relativos, a diferença entre os resultados obtidos e os resultados da bibliografia oscila entre 0 % e 8 %. Em termos absolutos, as diferenças médias de variação da posição da linha de costa por sector oscilam entre -7 cm/ano e +15 cm/ano (Tabela 2).

De acordo com os valores médios das taxas de variação da posição da linha de costa, quase todos os setores estão em erosão, corroborando a tendência erosiva que tem vindo a ser relatada para o litoral português (Tabela 3). Excetua-se o setor M2-s1 que pela forma específica de “baía”, protegida a Norte pelo Cabo Mondego e a Sul pelo prolongamento do quebramar Norte do porto da Figueira da Foz, promove acreção de sedimentos na praia da Claridade. Na análise da projeção observou-se que nos setores M3-s2 e M3-s3, a variação máxima localiza-se nas regiões de acreção. A análise na calibração indica que a variação máxima será esperada nas áreas de erosão costeira. Estes setores são delimitados a Sul pela presença de um esporão (ver Figura 3), onde se prevê uma área de deposição de sedimentos menor em relação à área de erosão esperada em todo o setor. Portanto, estes valores de variação máxima de acreção, não são representativos do principal comportamento erosivo que se prevê para os setores. O sector M4-s4, localizado num trecho de dinâmica sedimentar complexa e de difícil caracterização, regista um comportamento médio de estabilidade na projeção a 20 anos (+0.03 m/ano), apesar de ter sido verificada erosão no período considerado para a calibração.

As taxas médias de variação da posição da linha de costa medidas nas zonas localizadas imediatamente a sotamar dos pontos fixos que definem a fronteira Norte dos setores mostram um aumento na projeção a 20 anos, em comparação com os valores deduzidos na calibração a 50 anos (ver Tabela 2 e Tabela 3). Desta forma, verifica-se que há uma resposta da linha de costa mais acelerada nos primeiros anos de simulação e uma tendência de estabilização da posição da linha de costa se o processo de simulação for mais prolongado no tempo.

Os resultados aqui apresentados para a projeção do comportamento das praias arenosas a 20 anos, permitiram identificar os sectores em maior risco de erosão, destacando-se o setor Costa Nova-Vagueira, que evidencia uma área de erosão de cerca de 430 000 m<sup>2</sup>, seguido dos setores Costa de Lavos-Leirosa e Barra-Costa Nova.

A simulação da posição da linha de costa num horizonte temporal de 20 anos representa o cenário de referência. Neste sentido, no futuro prevê-se a discussão de projeções da evolução da posição da linha de costa considerando diferentes cenários de intervenção, para mitigação da erosão costeira. Tais cenários podem adotar novas estruturas de defesa costeira, como por exemplo, a construção de um esporão na Praia da Barra (cenário hipotético, representativo das potencialidades do estudo). Assim, na Figura 4 apresenta-se a avaliação do comportamento da linha de costa na presença de um esporão na praia da Barra. Avaliaram-se dois cenários: a localização de um esporão de 200m colocado a Norte (E200N), centro (E200C) e Sul (E200S) da praia da Barra e; o comprimento do esporão numa localização fixada na zona central da praia: 100 m (E100C), 200 m (E200C) e 300 m (300C) de comprimento.

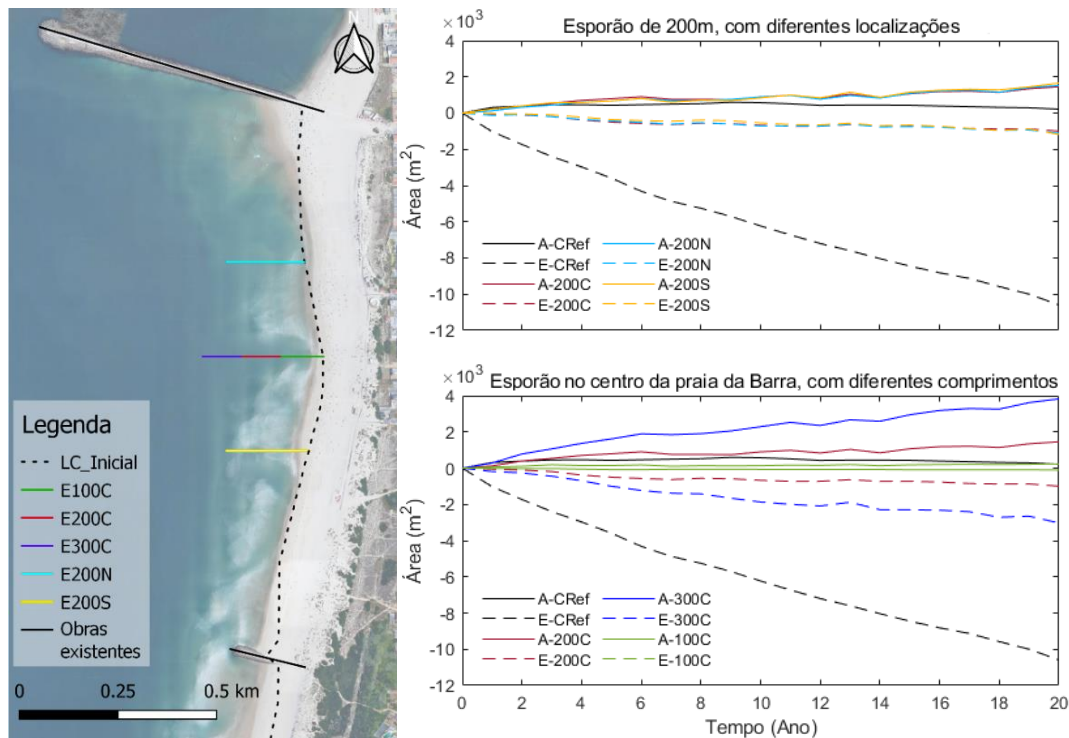


Figura 4. Esq.: Localização e dimensão de um esporão na praia da Barra. A linha de costa inicial é apresentada por uma linha tracejada a preto (LC\_Inicial) e as obras de proteção costeiras existentes por uma linha contínua preta. Dir.: Análise anual das áreas de erosão e acreção em função da localização de um esporão de 200m (acima) e, do comprimento do esporão numa localização fixa (abaixo). Acreção (A) representada por linhas contínuas e erosão (E) representada por linhas tracejadas.

A análise da evolução da posição da linha de costa no cenário de construção de um esporão de 200 m na praia da Barra, permite verificar que a diferença na localização não supõe um impacto significativo na variação da posição da linha de costa (Figura 4). No entanto, o prolongamento ou diminuição do comprimento do esporão mostram variabilidade na erosão e acreção ao longo do tempo. Sendo que um esporão de 300m no centro da barra poderia triplicar os níveis de deposição registados no cenário de referência. Esta opção também conseguiria reduzir os valores esperados de erosão. Os resultados deste exemplo mostram ser possível estimar os custos e benefícios associados a possíveis intervenções costeiras, enquadrando-se no âmbito do projeto COAST4US (*Aplicação da ferramenta COAST ao litoral português*), que visa avaliar cenários de mitigação da erosão costeira e prevê o desenvolvimento de análises de custo-benefício das intervenções, com base na posição da linha de costa, num horizonte temporal de 20 anos.

## Conclusões

O presente estudo pretendeu avaliar o comportamento da linha de costa num horizonte temporal de 20 anos, em três áreas costeiras em risco de erosão, localizados no litoral continental português. Para tal, foi considerado o modelo LTC para a simulação do comportamento da linha de costa. O modelo LTC permite fazer projeções da posição da linha de costa a médio-longo termo, em zonas costeiras arenosas, sendo baseado nos pressupostos dos modelos de '1-linha'. Os três locais de estudo, previamente identificados como áreas de alto risco à erosão por Lira *et al.* (2016), correspondem aos trechos: São Jacinto-Gafanha da Boa Hora; Cabo Mondego-Leirosa; Cova do Vapor-Fonte da Telha. De acordo com os pressupostos descritos, verifica-se que o modelo LTC demonstra valores médios e comportamentos longilitorais alinhados com os registos históricos, constituindo uma base de trabalho sólida para a projeção de diversos cenários de mitigação da erosão costeira.



Este trabalho permitiu identificar os setores que serão potencialmente mais afetados pelos efeitos dos processos erosivos. Verifica-se assim que o setor Costa Nova-Vagueira é o setor com maior vulnerabilidade à erosão, projetando-se em 20 anos uma erosão de cerca de 430 000 m<sup>2</sup>. Os setores Costa de Lavos-Leirosa e Barra-Costa Nova são setores que também registam perdas de território, com uma erosão na ordem dos 100 000 m<sup>2</sup>, seguido do setor da Praia de São João com uma previsão de cerca de 80 000 m<sup>2</sup> de área perdida em 20 anos. O estudo realizado evidenciou ainda uma resposta da linha de costa mais acelerada nos primeiros anos de simulação e uma ligeira tendência de estabilização da posição da linha de costa nos anos finais do horizonte temporal considerado.

Este trabalho facilita a interpretação das áreas de maior risco, permitindo a discussão de cenários de intervenção em conjunto com as entidades gestoras do litoral, nomeadamente com a Associação Portuguesa do Ambiente e com as Câmaras Municipais associadas às áreas em estudo. Este trabalho insere-se no âmbito do projeto COAST4US (*Aplicação da ferramenta COAST ao litoral português*), que visa avaliar cenários de mitigação da erosão costeira e prevê o desenvolvimento de análises de custo-benefício das intervenções, com base na posição da linha de costa, num horizonte temporal de 20 anos.

### Agradecimentos

O projeto COAST4US é financiado pelos EEA Grants, no âmbito do programa Crescimento Azul, operado pela Direção Geral de Política do Mar. O projeto tem como promotor a empresa R5 Consulting Engineers (R5e), e parceiros a R5m Marine Solutions (R5m) e a Universidade de Aveiro (UA).

### Referências Bibliográficas

- Coelho, C. (2005). "Riscos de exposição de frentes urbanas para diferentes intervenções de defesa costeira". Tese de Doutoramento. Universidade de Aveiro, 404 p.
- COSMO (2021). Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental, acessível em: <https://cosmo.apambiente.pt/> (último acesso janeiro/2022)
- Dean, R. (1977). Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts. Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report n. 12, University of Delaware, 45p.
- Dias JMA (1990) A evolução actual do litoral Português. Geonovas 11:15–28
- EUrosion. (2006). Viver com a erosão costeira na Europa – Sedimentos e espaço para a sustentabilidade. (P. Doody, M. Ferreira, S. Lombardo, I. Lucius, R. Misdorp, H. Niesing, ... J. P. Barbosa, Eds.) (1<sup>a</sup> ed.). Luxemburgo: Luxemburgo: Serviço das Publicações Oficiais das Comunidades Europeias.
- GeoFCUL (2021). MICORE wave download, acessível em: <http://disepla.fc.ul.pt/Micore/WaveDownload.html> (último acesso novembro/2021).
- Lima, M., & Coelho, C. (2017). "O modelo de evolução da linha de costa LTC: pressupostos, evolução, validação e aplicação". Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management, 17(1), 5-17.
- 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, pp. 265-278, doi: 10.5194/essd-8-265-2016.
- Pinto, C.A., Silveira, T., Taborda, R. (2015). Alimentação artificial das praias da Costa da Caparica: síntese dos resultados de monitorização (2007 A 2014). Ata da 3a Conferência sobre morfodinâmica estuarina e costeira, Universidade do Algarve, Faro, 47-48.
- Pranzini, E., Wetzel, L. & Williams, A.T. Aspects of coastal erosion and protection in Europe. J Coast Conserv 19, 445–459 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11852-015-0399-3>



- Romão S., Baptista, R. & Bernardes, C. (2015). "Balanço sedimentar costeiro no troço litoral entre a barra e a praia de mira". VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, pp. 1-13.
- Santos, F. D., Lopes, A. M., Moniz, G., Ramos, L., & Taborda, R. (2014). Gestão da Zona Costeira, O Desafio da Mudança - Sumário Executivo e Recomendações. Relatório do Grupo de trabalho do Litoral, 237.
- Santos, F. D. & Miranda, P. (2006). Alterações climáticas em Portugal: Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projecto Siam II. Gradiva, Lisboa. ISBN 989-616-081-3.
- Stronkhorst, J., Huisman, B., Giardino, A., Santinelli, G., & Santos, F. D. (2018). Sand nourishment strategies to mitigate coastal erosion and sea level rise at the coasts of Holland (The Netherlands) and Aveiro (Portugal) in the 21st century. *Ocean & Coastal Management*, 156, 266-276.
- Syvitski, J. P., Kettner, A. J., Overeem, I., Hutton, E. W., Hannon, M. T., Brakenridge, G. R., Day, J., Vörösmarty, C., Saito, Y., Giosan, L., & Nicholls, R. J. (2009). Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience*, 2(10), 681-686.
- Taborda, R., Andrade, C., Silva, A., Silveira, T., Lira, C., Freitas, M., Pinto, C. (2014) Modelo de circulação sedimentar litoral no arco Caparica-Espichel. *Comunicações Geológicas*, 101, Especial II, pp. 641-644.
- Valle, A. (2014). Perda de Território por Ação do Mar: Uma Questão Nacional. *Ingenium II*. Série n.º 141, Maio/Junho 2014.