

ESTUDO DA EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA NO LITORAL DE QUARTEIRA

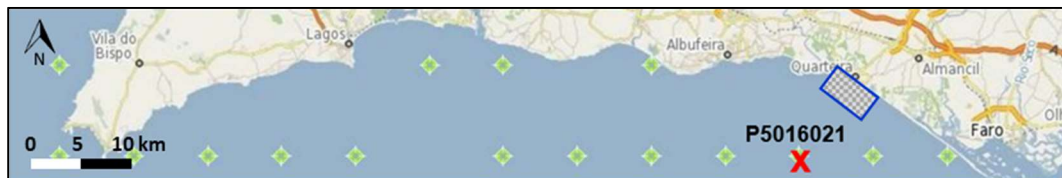
Rita Pombo; Margarida Ferreira; Carlos Coelho
RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro
ritanovo@ua.pt, margarida.ferreira@ua.pt, ccoelho@ua.pt

Resumo

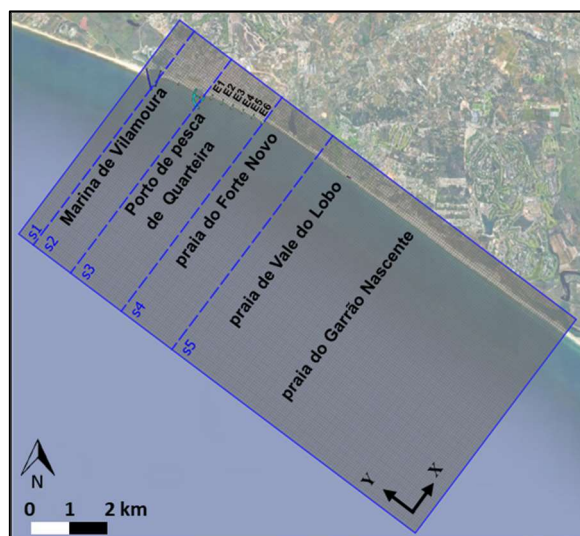
Este trabalho apresenta os resultados das projeções da linha de costa no horizonte 2020-2070, para diferentes cenários de reestruturação do campo de esporões de Quarteira, com o objetivo de manter a sua posição atual e, idealmente, aumentar a largura de praia. Após a caracterização física da área de estudo e calibração do modelo numérico de evolução da linha de costa, realizaram-se testes preliminares para avaliação da sensibilidade do modelo, tendo-se convergido na definição de oito cenários de intervenção. Os cenários simulados avaliaram o efeito da eliminação de alguns esporões existentes e o prolongamento de outros, e a sua conjugação simultânea com operações de alimentação artificial de sedimentos. Todos os cenários foram replicados considerando a subida do nível do mar por efeito das alterações climáticas. Os resultados antecipam o agravamento da situação de referência nos próximos anos devido ao défice sedimentar verificado, mas a retirada de esporões alternados e o prolongamento de outros remanescentes demonstra cumprir o objetivo quando se prevêem realizar alimentações artificiais periódicas num volume de 200 000 m³/biénio.

Introdução

Este artigo tem como objetivo geral o resumo do trabalho relativo ao estudo de evolução da linha de costa no litoral de Quarteira, realizado com a intenção de definir soluções que assegurem a posição da linha de costa atual e que, preferencialmente, também potenciem o aumento da largura de praia (Figura 1).



a) Localização do ponto de caracterização da agitação marítima e da zona de estudo



b) Caracterização do domínio de cálculo



c) Numeração de obras na zona a intervir
(Fonte: <https://www.algarvetips.com/beaches/loule/praiade-quarteira/>)

Figura 1. Caso de estudo.



Para tal, avaliou-se o impacto de cenários específicos de intervenção num horizonte temporal de 50 anos. Por questões de modelação numérica, o troço costeiro analisado abrange a totalidade da faixa costeira do município de Loulé, englobando a marina de Vilamoura, o porto de pesca de Quarteira, o campo de esporões existente e a obra de enrocamento de Vale do Lobo. No entanto, a análise de resultados foca-se nos setores de proximidade da área de interesse, ou seja, numa extensão de cerca de 3 km na frente de Quarteira. Os trabalhos realizados consideraram a recolha de informação de base, a definição do domínio de cálculo, a calibração do modelo e a projeção de diferentes cenários de evolução de linha de costa. Assim sendo, o documento encontra-se estruturado do seguinte modo: depois da introdução, apresenta-se a caracterização da agitação marítima e do transporte sólido longitudinal no litoral de Quarteira, que são condicionantes fundamentais da dinâmica morfológica. De seguida descreve-se a preparação do modelo numérico considerado no estudo e apresentam-se os trabalhos de calibração do modelo que permitiram a definição do clima de agitação representativo e dos cenários de intervenção. Seguidamente são discutidos os resultados obtidos nos diversos cenários simulados, incluindo no cenário de referência (manutenção da situação atual) e nos cenários propostos (que compreendem a eliminação de alguns esporões existentes, o prolongamento de outros e a combinação destas ações com operações de alimentação artificial de sedimentos). Por fim, são apresentadas as principais considerações do estudo.

Clima de Agitação e Transporte Sólido Longitudinal

A agitação marítima incidente é considerada o principal agente de transporte de sedimentos que ocorre ao longo do litoral, com impacto na respetiva morfologia, maioritariamente resultante da relação dinâmica entre a ação conjugada de ondas, marés e correntes e as características e disponibilidades de areias nos setores costeiros. Em termos médios, a agitação marítima ao largo da costa sul de Portugal continental caracteriza-se por uma altura de onda significativa média de 1 m, um período de pico médio de 8.2 s e ondas maioritariamente provenientes do setor W-SW (71%) com cerca de 23% provenientes do setor E-SE, de acordo com Costa *et al.* (2001). Quanto à deriva litoral, o relatório do Grupo de Trabalho do Litoral (Santos *et al.*, 2014) refere uma resultante de oeste para este com magnitude estimada de 110 000 m³/ano na célula sedimentar entre os Olhos de Água e a foz do Guadiana, onde se insere o local de estudo.

Clima de Agitação

Com o objetivo de se proceder à modelação numérica e à projeção de cenários de evolução da posição da linha de costa, começou-se por caracterizar de forma mais aprofundada o clima de agitação marítima representativo da zona de estudo e a correspondente capacidade de transporte sólido longitudinal. A análise iniciou-se com a identificação de diversos registos de agitação marítima ao largo, no sentido de identificar o que conduzisse a valores médios dos parâmetros característicos (*i.e.*, altura significativa, período e direção de onda) próximos aos referidos na bibliografia. Para tal, considerou-se um período de 50 anos e analisaram-se séries de agitação marítima disponibilizadas em diferentes bases de dados, tendo-se concluído que os valores médios das características da agitação marítima da série dos *Puertos del Estado* (2021) são os que apresentam uma maior concordância com os valores da bibliografia para a costa sul de Portugal, especialmente no ponto P5016021 cuja localização se identifica na Figura 1.

A rosa de rumos da proveniência da agitação demonstra que existe uma maior proveniência do quadrante W ou WSW (Figura 2), sendo o valor médio do rumo da agitação ao largo igual a 229.30° N (ângulo medido com o norte, no sentido horário). Como referido, este ponto correspondente a registos de agitação ao largo, ou seja, em condições de águas profundas. Como tal, para quantificar o transporte sólido longitudinal ao longo da costa, procedeu-se ao estudo da propagação das ondas de forma a obter as características na rebentação. Para este efeito consideraram-se, de forma simplificada, os fenómenos de empolamento e refração que ocorrem devido à interação da onda com as fronteiras sólidas naturais e artificiais, assumindo que a zona de estudo apresenta uma batimetria regular e paralela. Na Tabela 1 sintetizam-se os valores mínimos, médios e máximos das características da agitação marítima, obtidos ao largo e após a propagação até à rebentação. Os resultados sugerem que a altura média de onda ao



largo é de 0.73 m, acrescentando-se que cerca de 80% dos registos é inferior a 1 m e cerca de 20% têm entre 1 m e 3 m. Na rebentação, como expectável, o valor médio sobe por efeito do empolamento.

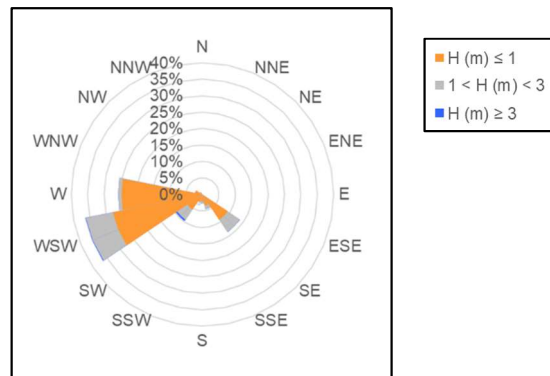


Figura 2. Rosa de rumos e respetivas alturas de onda, ao largo, no ponto P5016021.

Tabela 1. Valores mínimos, médios e máximos da altura de onda, ao largo e na rebentação, para os registos com origem no ponto P5016021.

	Altura de onda (m)	
	ao largo	na rebentação
Mín.	0.02	0.00
Méd.	0.73	0.87
Máx.	6.43	7.05

Transporte Sólido Longitudinal

Com base nos valores obtidos para a agitação na rebentação quantificou-se o transporte sólido longitudinal. O volume em transporte foi calculado através da fórmula CERC (1984) cujo valor do coeficiente empírico, k , foi definido de forma a que o resultado médio anual obtido se aproxime do valor de deriva litoral referido na bibliografia para o setor costeiro em análise (*i.e.*, 110 000 m³/ano). Neste sentido, foi considerado $k = 0.0725$. Além disso, para aplicação da fórmula CERC (Equação 1), considerou-se: massa volúmica da água, $\rho = 1027 \text{ kg/m}^3$; massa volúmica dos sedimentos, $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$; aceleração da gravidade, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; índice de profundidade de rebentação, $\gamma_b = 0.78$; e porosidade, $n = 0.4$.

$$Q = k \left(\frac{\rho \sqrt{g}}{16 \gamma_b^{1/2} (\rho_s - \rho) (1 - n)} \right) H_{sb}^{5/2} \sin(2\theta_b) \quad \text{Eq. 1}$$

Na Tabela 2 indicam-se os valores médios de transporte quantificados nas direções oeste-este (W-E) e este-oeste (E-W), e o valor líquido (diferença entre as componentes W-E e E-W) e bruto (soma das componentes W-E e E-W). A análise dos resultados permite verificar que o transporte de sedimentos ocorre predominantemente na direção W-E, sendo a componente de transporte nessa direção significativamente superior à componente na direção E-W.

Tabela 2. Valores médios do transporte sólido longitudinal ($\times 10^5 \text{ m}^3/\text{ano}$), obtidos por aplicação da fórmula CERC.

Ponto	Direção W-E	Direção E-W	Valor líquido	Valor bruto
P5016021	1.47	0.38	1.10	1.85



Alterações Climáticas

Os trabalhos já realizados sobre o efeito das alterações climáticas na agitação marítima da costa algarvia apontam para um impacto pouco significativo, induzindo até uma eventual redução da capacidade energética (Almeida *et al.*, 2011). No entanto, o efeito das alterações climáticas repercute-se de forma evidente na subida do nível do mar. No presente estudo, a definição do valor a adotar para a subida do nível médio do mar foi realizada através da análise dos valores propostos por Antunes *et al.* (2018) para a projeção MOD.FC_2SUL. Os autores apresentam um conjunto de projeções de origem empírica, sendo que MOD.FC_2SUL é uma projeção ajustada localmente à costa algarvia. Este modelo previa um nível médio do mar relativo de 0.21 m em 2020, 0.47 m em 2050 e 1.26 m em 2100. Tomando como referência estes valores, procedeu-se à interpolação para efeitos de simulação de cenários a 50 anos, estimando que o valor do nível do mar em 2070 seja de 0.73 m, o que representa uma subida do nível do mar de 52 cm em relação a 2020, ou seja, aproximadamente 10.5 mm/ano.

Domínio de Cálculo do Modelo de Evolução da Linha de Costa

O LTC é um modelo numérico de uma linha para aplicação a praias arenosas e considera que o transporte sedimentar longitudinal, juntamente com as condições fronteiras nos extremos da grelha modelada, são as principais causas das alterações na zona costeira, sendo o transporte sedimentar longitudinal condicionado e controlado pela ação das ondas, correntes, níveis de água, natureza dos sedimentos e pela sua fonte (Coelho, 2005). Com o objetivo de caracterizar e reproduzir o trecho costeiro neste modelo, foi avaliada a evolução do litoral costeiro quanto à construção de estruturas de defesa costeira e ao registo histórico de taxas de recuo. Desta forma foi possível calibrar o modelo, preparando uma base representativa dos processos locais.

Intervenções Costeiras Existentes

Foram caracterizadas as estruturas de defesa costeira existentes na área de estudo, considerando dimensões em planta e coordenadas de implantação, tendo-se identificado os molhes de acesso à marina de Vilamoura, o porto de pesca de Quarteira, o campo de esporões de Quarteira (contabilizados desde poente, correspondendo às designações E1 a E6 conforme Figura 1) e a obra de enrocamento existente na zona de Vale do Lobo.

As estruturas de defesa costeira representam pontos fixos no modelo: os esporões criam barreiras transversais ao transporte sedimentar longilitoral e as obras aderentes fixam a posição da linha de costa impedindo o recuo para além da sua linha de implantação. Tendo como referência a localização das estruturas identificadas, foi definida uma malha de cálculo que abrange todo o litoral costeiro do município de Loulé. A direção principal da malha (eixo YY) foi definida paralela à orientação média da linha de costa neste trecho pelo que, para efeitos de modelação, foi rodada 53° no sentido horário para a posição alinhada às coordenadas do modelo LTC. Deste modo, a fronteira barlar do modelo fica definida pelos molhes da marina de Vilamoura e a fronteira sotamar localiza-se a uma distância suficientemente afastada da zona em análise para eliminar eventuais efeitos das condições fronteira.

A malha de cálculo é assim constituída por uma grelha regular de pontos igualmente espaçados de 20 m nas 2 direções de análise, com uma dimensão total de 7 x 13 km². Para avaliação de comportamentos localizados identificaram-se 5 setores (em função da posição das estruturas costeiras e portuárias existentes, e da extensão de linha de costa), conforme se visualiza na Figura 1, do seguinte modo:

- s1 – entre o limite poente do município e o molhe nascente da marina;
- s2 – entre o molhe nascente da marina e o molhe nascente do porto de pesca;
- s3 – entre o molhe nascente do porto de pesca e o esporão nascente;
- s4 – extensão igual à do setor s3 (1 660 m), medida desde o esporão nascente;
- s5 – entre o limite nascente do setor s4 e o limite nascente do município.



As áreas principais de análise dos resultados são as praias do campo de esporões de Quarteira (setor s3) e a zona a sotamar (setor s4), numa extensão total de 3 320 m de linha de costa. Os setores s1, s2 e s5, localizados mais próximos das fronteiras do domínio de cálculo, funcionam como zona de estabilização do comportamento geral do modelo, não sendo objeto principal de investigação.

Linha de Costa Inicial

A linha de costa inicial do modelo foi determinada com base na ortofoto de 11/03/2021, com referência ao nível médio do mar (+2 m ZH) e serve de referência para a análise das projeções efetuadas.

Taxas de Recuo Históricas

A evolução morfológica do litoral de Quarteira tem sido fortemente condicionada pelas ações de intervenção humana realizadas neste local. Nomeadamente, a construção dos molhes de acesso à marina de Vilamoura na década de 1970 desencadeou um processo de alteração da dinâmica sedimentar, com reflexos diretos na intensidade da erosão sentida no litoral de Quarteira. De forma semelhante, o campo de esporões de Quarteira induziu um incremento da erosão a sotamar das obras que se propagou no sentido do transporte longilitoral (de oeste para este). Com o propósito de contrariar a tendência erosiva e estabilizar este trecho costeiro, têm vindo a ser executadas operações de alimentação artificial de praia. Estas flutuações morfológicas foram já avaliadas em diversos estudos que analisaram a posição da linha de costa em períodos passados, dos quais se destacam três referências bibliográficas principais: Teixeira (2010), Lira *et al.* (2016) e Luijendijk *et al.* (2018).

De acordo com o estudo específico apresentado por Teixeira (2010) sobre o agravamento do risco associado à erosão costeira em Loulé, o troço entre o Forte Novo e o Garrão (ver Figura 1) era onde se verificavam as taxas mais elevadas de recuo por erosão costeira no Algarve, indicando valores médios na ordem de 0.5 m/ano, desde 1958 até meados da década de 1970. Lira *et al.* (2016) indica taxas de recuo médias no período compreendido entre 1958 e 2010 de cerca de 0.6 m/ano na proximidade de Vale do Lobo (que se localiza entre o Forte Novo e o Garrão), indiciando que a tendência erosiva determinada por Teixeira (2010) se manteve, em termos médios, com a mesma ordem de grandeza até ao ano 2010. Luijendijk *et al.* (2018) reflete o passado mais recente, entre 1984 e 2016, e acrescenta informação sobre a evolução da linha de costa na zona do campo de esporões que regista recuos médios entre 0.3 m/ano e 0.5 m/ano entre os esporões E2 e E6, gradualmente crescentes para sotamar. Na mesma referência, identifica-se o agravamento da erosão imediatamente a sotamar do esporão E6 que regista um recuo médio de 1.8 m/ano no período de análise, estabilizando progressivamente no sentido nascente até ao valor de 0.4 m/ano junto à praia de Loulé Velho (afastada 2 km para nascente de E6), o que também vai de encontro às tendências mencionadas nas duas referências anteriores para esta zona.

Modelo Topo-Batimétrico

Para a definição da batimetria foram extraídos dois perfis transversais do levantamento topo-hidrográfico mais recente, à data deste estudo, do Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental (COSMO, 2021), realizado entre a praia do Forte Novo e a praia do Garrão Nascente em outubro de 2019. Os perfis levantados foram designados PT1 e PT2 e têm 1.62 km e 1.52 km de extensão, respetivamente. Por exigências do processo de modelação, estes perfis foram seguidamente simplificados através da sua aproximação aos respetivos perfis de equilíbrio que melhor representam a batimetria real, de acordo com a Equação 2 proposta por Dean (1977), assumindo o pressuposto da dissipação uniforme da energia das ondas.

$$h = Ax^m \quad \text{Eq. 2}$$

Nesta equação, h representa a profundidade à distância x , medida desde a linha de costa em nível médio. Relativamente ao expoente de Dean, testaram-se os valores $m = 2/5$ (para praias refletivas) e $m = 1/2$, $m = 4/7$ e $m = 2/3$ (para praias intermédias). Concluiu-se que o valor $m = 1/2$, representativo de praias classificadas como intermédias com tendência para refletiva, é

o que melhor se aproxima à batimetria real, pelo que o mesmo foi considerado para a determinação dos referidos perfis de equilíbrio, resultando no valor $A = 0.3547$ no perfil de Dean aproximado ao perfil PT1 e $A = 0.3655$ no perfil de Dean aproximado ao perfil PT2.

De acordo com os pressupostos referidos, foi possível construir o perfil topo-batimétrico de referência (“PT_referência”, ver Figura 3a) para aplicar no modelo de cálculo, em que: para estimativa da batimetria foi então adotado o perfil de equilíbrio médio, com $A = 0.3601$; para estimativa da topografia foi considerado um declive constante de 10% a partir da linha de costa, tendo em conta a referência de 6.5° indicada por Teixeira (2009) para o declive médio da face de praia entre a Quarteira e o Garrão. Na mesma Figura representam-se os perfis originais, “PT1_real” e “PT2_real”, com cotas entre 5.82 m (ZH) e -11.14 m (ZH) e entre 7.34 m (ZH) e -11.32 m (ZH), respetivamente. Conhecida a posição da linha de costa e obtido o perfil transversal de referência, produziu-se o modelo topo-hidrográfico esquematizado na Figura 3b, sensivelmente entre as cotas -25 m e +25 m (ZH), com margem suficiente aos limites da profundidade de fecho indicados para a costa algarvia, estimada entre -8 m (ZH) e os -13 m (ZH) (Teixeira e Pinto, 2018). Como referido anteriormente, o domínio de cálculo foi definido com cinco setores e a análise dos resultados enfoca o s3 e s4.

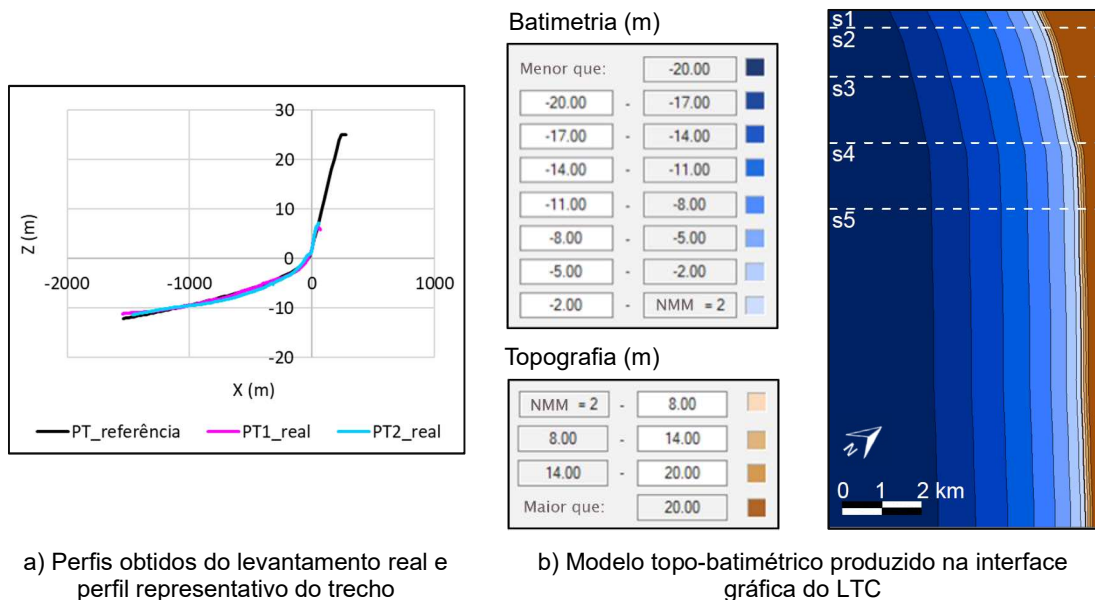


Figura 3. Definição da batimetria e topografia do modelo.

Calibração do Modelo de Evolução da Linha de Costa

No sentido de pré-avaliar o impacto do clima de agitação e dos parâmetros de calibração nos resultados numéricos da evolução da linha de costa, executaram-se os testes de sensibilidade que se descrevem de imediato.

Clima de Agitação: Análise de Anos Típicos e Extremos

Com o objetivo de discutir primeiro as incertezas da evolução da linha de costa associadas à definição do clima de agitação marítima futuro, foram testadas diferentes séries de agitação, definidas com base na análise dos anos típicos e extremos da série original de 50 anos de registos dos *Puertos del Estado*. Para tal, identificaram-se os 5 anos máximos e os 5 anos mínimos (10 anos extremos) e os 5 anos típicos de capacidade média anual de transporte sólido longitudinal (Figura 4). Com base na análise realizada, verifica-se que os anos de 1981, 1985, 1997, 2001 e 2017 são os que apresentam valores de transporte sólido anual mais próximos do valor médio (anos típicos); os anos de 1975, 1988, 1990, 1991 e 2005 são os cinco anos que



apresentam menor capacidade de transporte sedimentar longitudinal líquido; e os anos mais recentes de 2009, 2013, 2014, 2016 e 2018 são os que apresentam maior capacidade de transporte líquido anual (ver Figura 4).

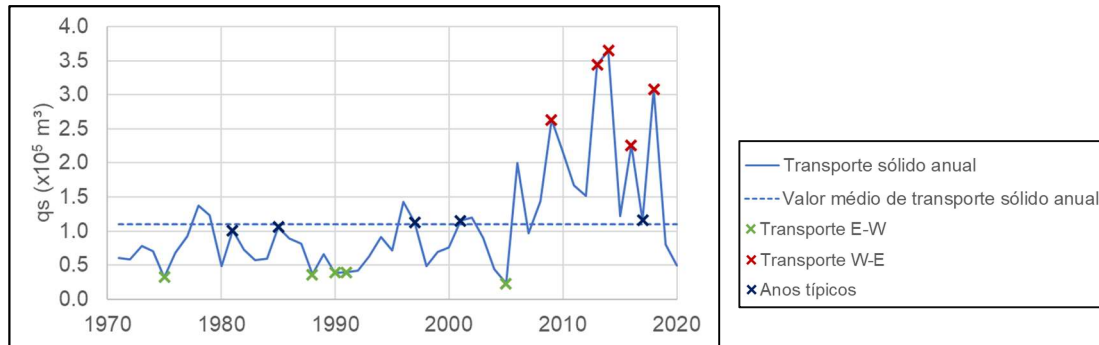


Figura 4. Anos típicos e extremos de transporte sólido longitudinal, obtidos por aplicação da fórmula CERC.

De seguida, geraram-se três novas séries de agitação marítima com 50 anos de registos: uma série de anos típicos (10 vezes os 5 anos típicos); uma série de transporte mínimo (10 vezes os 5 anos com menor capacidade de transporte sedimentar); e uma série de transporte máximo (10 vezes os 5 anos com maior capacidade de transporte sedimentar). Através da aplicação destas séries como agentes forçadores no modelo numérico, foi então possível efetuar uma análise prévia do impacto do clima de agitação futuro.

Observa-se que a série inicial de registos cronológicos situa-se, em termos do transporte longitudinal promovido, entre a envolvente delimitada pelas séries de extremos, e próxima à série de anos típicos. Particularmente, a série cronológica apresenta um recuo médio nos setores s3 e s4 de 18 cm/ano, ao fim de 50 anos de simulação, o que se assemelha à série criada com os anos típicos que apresenta um recuo médio de 16 cm/ano. Pelo oposto, as séries de extremos de transporte mínimo e máximo resultam, respetivamente, em recuos médios de 3 cm/ano e 55 cm/ano nos referidos setores. Além disso, a diferenças da posição da linha de costa nas séries cronológica e de anos típicos oscila apenas entre cerca de -10% e +10% em termos médios pelo que, de acordo com esta análise, se optou por manter nas projeções seguintes o clima de agitação na sequência original cronológica de 50 anos obtida dos *Puertos del Estado*.

Taxas de Transporte Sólido Longitudinal vs. Taxas de Recuo da Linha de Costa

Considerando então a série cronológica dos registos de agitação, foi testada a sensibilidade do modelo à variação do coeficiente empírico na fórmula de CERC (com $k = 0.03$, $k = 0.06$ e $k = 0.08$) e o respetivo impacto nas taxas de recuo da linha de costa e no transporte sedimentar, tendo como referência os valores históricos descritos na bibliografia. Esta abordagem foi adotada porque é usualmente difícil assegurar simultaneamente uma boa representação de ambos os parâmetros nos processos de modelação da evolução da linha de costa com recurso a modelos de uma-linha para projeções de longo prazo.

Assim, na calibração para as taxas de recuo, foi considerado o estudo de Luijendijk *et al.* (2018) por ser a referência bibliográfica que apresenta dados mais recentes (1984 a 2016) e avalia um número maior de transeptos na zona de interesse. Na calibração para o transporte sólido longitudinal, foi considerado o valor de 110 000 m³/ano. Os testes de calibração demonstram para $k = 0.03$ um transporte sólido de 95 724 m³/ano, muito próximo à referência. No entanto, para este valor concordante de transporte, as taxas de recuo da linha de costa ficam aquém dos valores da literatura. A nascente do esporão E6, ou seja, a sotamar do campo de esporões, Luijendijk *et al.* (2018) indicam um recuo médio de 1.8 m/ano enquanto a simulação para $k = 0.03$ indica um recuo de apenas 0.1 m/ano, sendo esta a diferença máxima entre comportamentos

observados e simulados. Como se verifica regularmente a dificuldade de calibrar simultaneamente os resultados das taxas de recuo da linha de costa e de transporte sólido longitudinal e constatando-se que as taxas de recuo registam uma ordem de grandeza baixa, mas genericamente representativa das tendências globais da zona de estudo, optou-se por prosseguir a calibração do modelo para as taxas de transporte, onde $k = 0.035$ é o valor ótimo que traduz um transporte sólido longitudinal de $111\ 070\ \text{m}^3/\text{ano}$, convergente com a literatura.

Cenários Simulados

No presente capítulo apresentam-se os resultados do impacto de diferentes cenários de intervenção costeira na evolução da posição da linha de costa no litoral de Quarteira, ao longo de 50 anos (horizonte 2020-2070). Esta análise tem por base os pressupostos elucidados anteriormente e compara, para o mesmo instante, a evolução da posição da linha de costa no cenário de referência com a posição da linha de costa considerando a realização de intervenções costeiras na área de estudo. Adicionalmente, distinguem-se as situações de não se considerar o efeito da subida do nível médio da água do mar (*Sea Level Rise - SLR*) e de se considerar uma subida igual a $10.5\ \text{mm/ano}$, respetivamente abreviadas para “sem SLR” e “com SLR”.

Cenário de Referência

Na Tabela 3 indicam-se os resultados globais dos setores s3 e s4 para o cenário de referência (CR) que corresponde, conforme a designação indica, à evolução da linha de costa admitindo a manutenção das obras existentes, não acrescentando intervenções no período de simulação.

Tabela 3. Evolução do litoral de Quarteira (setores s3 e s4) ao fim de 50 anos, no cenário de referência.

	sem SLR	com SLR
Área perdida (m^2)	12 638	23 712
Recuo médio (m)	3.81	7.14
Recuo médio anual (m/ano)	0.08	0.14

Verifica-se uma tendência erosiva que conduz a uma perda de território superior a 1.26 ha na situação de não ser considerada a subida do nível médio da água do mar e 2.37 ha na situação em que o efeito da subida do nível médio da água do mar é incluído no modelo. Esta tendência intensifica-se ao longo do período de análise, sendo que as manchas de erosão apresentam maior expressão nas zonas entre os esporões E1 e E3 e a sotamar de E6 (ver Figura 5). O máximo recuo da posição da linha de costa ocorre entre os esporões E1 e E2, com valor superior a 50 m, ou seja, superior a 1 m/ano.



Figura 5. Identificação de áreas perdidas e ganhas (setores s3 e s4) ao fim de 50 anos, no cenário de referência.



Cenários de Intervenção

Nesta secção é finalmente discutido o impacto dos cenários de intervenção propostos na evolução da linha de costa do litoral de Quarteira. Estes cenários, discriminados na Tabela 4, incluem a retirada de esporões existentes, o prolongamento do comprimento de outros esporões e a combinação destas intervenções com a realização de operações de alimentação artificial de praia. A convergência para a definição dos oito cenários mencionados decorre da execução de análises prévias em consonância com as entidades envolvidas no estudo, através de comentários e sugestões partilhados em reuniões decorridas durante o projeto.

Tabela 4. Descrição dos cenários de intervenção avaliados.

C1	Retirar os esporões E2 e E4 e prolongar os esporões E3 e E5 em 40 m
C2	Retirar os esporões E2 e E4 e prolongar os esporões E3 e E5 em 80 m
C3	Retirar os esporões E1 e E3 e prolongar os esporões E2 e E4 em 40 m
C4	Retirar os esporões E1 e E3 e prolongar os esporões E2 e E4 em 80 m
C5	Realizar alimentação artificial de sedimentos de 10 em 10 anos, com um volume de 1 000 000 m ³ de sedimentos depositados na zona do campo de esporões (setor s3)
C6	Realizar alimentação artificial de sedimentos de 10 em 10 anos, com um volume de 1 000 000 m ³ depositado em toda a extensão de Quarteira até Vale do Lobo (setores s3 e s4, reproduzindo o projeto de execução de alimentações artificiais já planeado)
C7	Replicar o cenário C4 (cenário com melhores resultados entre C1 e C4) e adicionar a alimentação artificial de sedimentos com as características consideradas no cenário C5
C8	Replicar o cenário C4 e adicionar a alimentação artificial de sedimentos com as características consideradas no cenário C6

De acordo com as projeções em modelo numérico para o horizonte de 50 anos foi possível avaliar a evolução da linha de costa, quantificando as áreas de território perdidas ou ganhas nos setores s3 e s4, para o cenário de referência (CR) e para os oito cenários de intervenção (C1 a C8), conforme resultados demonstrados na Figura 6.

Verifica-se desde logo que os maiores impactos ocorrem no setor s3, que compreende a zona entre o molhe nascente do porto de pesca de Quarteira e o último esporão a nascente, E6, para onde se propõem a maioria das medidas de intervenção. Além disso, nos cenários que compreendem alimentações artificiais de sedimentos (C5 a C8), o setor s3 beneficia da deposição de sedimentos concentrada na frente de Quarteira (C5 e C7), enquanto o setor s4 beneficia da deposição de sedimentos distribuída entre a Quarteira e Vale do Lobo (C6 e C8). Nestes cenários (C5 e C7 do setor s3, e C6 e C8 do setor s4), verifica-se a acreção de sedimentos para ambas as opções de subida do nível do mar. Os cenários C1 a C4, que contemplam apenas a retirada de determinados esporões e o prolongamento de outros, sem recurso a operações complementares de alimentação artificial, conduzem genericamente a perdas de território superiores às obtidas no cenário de referência, também com maior expressão no setor s3. Esta tendência intensifica-se ao longo do tempo. Expectavelmente, a subida do nível médio da água do mar intensifica a perda de território, reprimindo a acreção sedimentar.

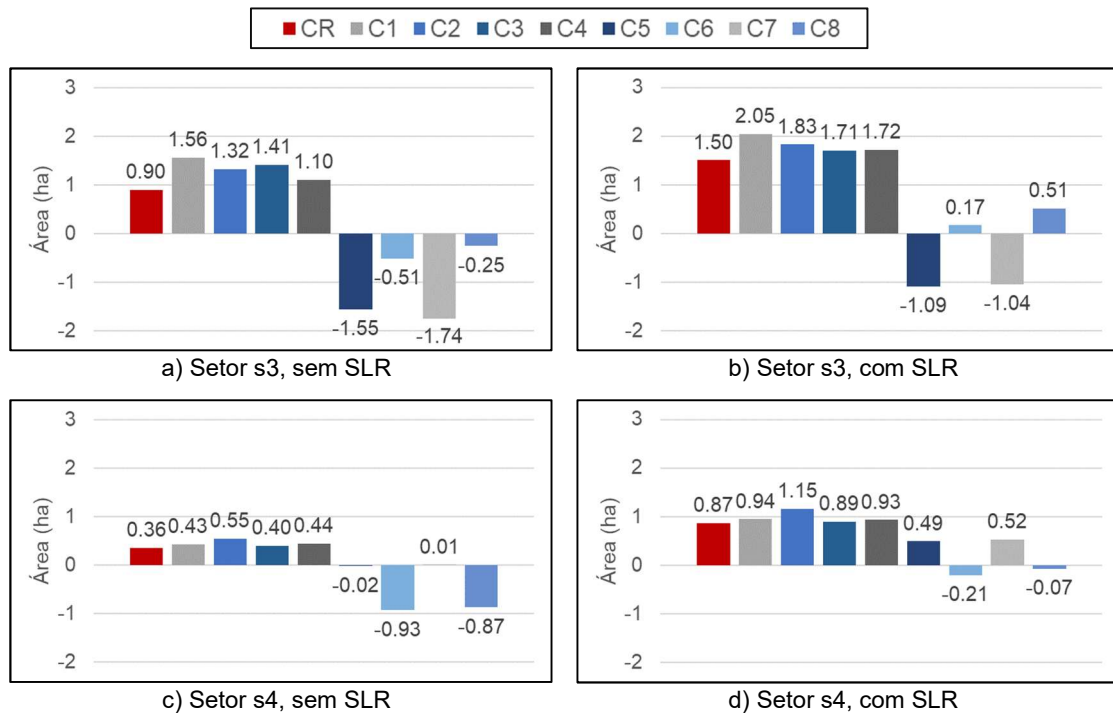


Figura 6. Áreas de território perdidas ao fim de 50 anos, nos vários cenários de intervenção (áreas negativas representam acreção).

Nas Tabelas 5 e 6 apresenta-se o impacto das intervenções na largura média de praia ao fim de 50 anos, resultante da diferença entre a posição da linha de costa no cenário de intervenção e a posição da linha de costa no cenário de referência para os setores s3 e s4. Este impacto é apresentado para os subsetores definidos entre esporões, permitindo uma análise mais pormenorizada da sua evolução espacial.

Para o cenário C1 e C2 a análise dos resultados mostra que o impacto da retirada dos esporões E2 e E4, conjuntamente com o prolongamento do comprimento dos esporões E3 e E5, reflete-se numa perda significativa da largura média nos subsetores localizados a sotamar dos esporões prolongados (E3-E4 e E5-E6), com valores entre 2 e 12 m. Para os cenários C3 e C4 (de retirada dos esporões E1 e E3 e prolongamento dos esporões E2 e E4), as tendências observadas são semelhantes; isto é, os subsetores localizados a sotamar dos esporões prolongados apresentam perdas na largura média de praia, com valores entre 4 e 22 m.

A análise dos cenários C5 e C6, que prevê a realização de alimentação artificial de sedimentos de 10 em 10 anos, demonstra ganhos de largura média de praia em todos os setores, para ambas as situações de nível do mar, com ganhos máximos de 24 m no setor E1-E2 no cenário C5 com SLR, e 10 m no setor E4-E5 no cenário C6 com SLR. Finalmente nos cenários C7 e C8, que replicam as condições do cenário C4 com as condições de alimentação artificial dos cenários C5 e C6, respetivamente, verifica-se o benefício em termos do aumento da largura de praia com expressão significativa no subsetor E1-E2 (32 m sem SLR e 31 m com SRL no C7; 27 m sem SLR e 26 m com SLR no C8) e no subsetor E3-E4 (23 m sem ou com SLR no C7; cerca de 15 m sem ou com SLR no C8).

Os cenários C5, C6 e C7 são os únicos que representam benefícios para todos os subsetores de análise (células a verde nas Tabelas 5 e 6), mesmo na situação de considerar a subida do nível do mar. Especialmente, o cenário C7, que conjuga a retirada dos esporões E1 e E3 e o prolongamento dos esporões E2 e E4 em 80 m com operações de alimentação artificial de praia de 10 em 10 anos na frente de Quarteira, é a intervenção para a qual se obtêm maiores ganhos na largura de praia. Para este cenário têm-se, ao fim de 50 anos de simulação, ganhos superiores



a 30 m no subsetor E1-E2 e ganhos superiores a 20 m no subsetor E3-E4 para qualquer nível de mar. Os subsectores E2-E3, E4-E5 e E5-E6 apresentam ganhos próximos de 10 m. O cenário C6 apresenta ganhos menores, pois representa a distribuição do mesmo volume que C5 e C7 por uma maior extensão litoral, e o cenário C8, que também considera a distribuição dos sedimentos numa área maior, apresenta ainda o prejuízo nos subsectores porto de pesca-E1 e E2-E3.

Tabela 5. Impacto das intervenções na largura média de praia (m) ao fim de 50 anos, sem SLR.

Trecho	CR	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Porto de pesca-E1	4.25	0.21	-0.93	-16.00	-15.12	11.67	4.72	7.62	-7.12
E1-E2	-27.46	-26.26	-18.32	0.00	22.27	26.40	10.57	32.30	26.83
E2-E3	-7.63	10.91	14.33	-18.21	-18.92	16.67	10.64	10.87	-4.47
E3-E4	-1.54	-9.64	-11.80	0.00	9.89	14.07	9.74	22.88	15.25
E4-E5	1.84	6.22	9.13	0.00	-6.65	10.10	6.26	8.45	0.84
E5-E6	1.85	-2.09	-5.27	0.00	-5.88	9.21	8.03	10.32	3.87
s4	-2.16	-0.39	-1.09	-0.19	-0.45	2.26	7.69	2.10	7.32

Tabela 6. Impacto das intervenções na largura média de praia (m) ao fim de 50 anos, com SLR.

Trecho	CR	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Porto de pesca-E1	3.06	-0.73	-0.89	-15.29	-15.31	7.38	1.41	4.56	-12.59
E1-E2	-29.66	-27.20	-21.23	13.23	20.87	23.58	7.57	30.98	25.64
E2-E3	-11.28	11.76	16.02	-21.76	-22.45	17.88	8.23	9.81	-7.61
E3-E4	-6.00	-9.26	-11.54	10.41	11.46	16.76	10.01	23.31	15.61
E4-E5	-4.50	10.14	12.04	0.65	-3.92	13.89	10.26	10.99	3.82
E5-E6	-1.54	-1.63	-3.64	-1.60	-5.86	11.87	8.86	8.37	2.99
s4	-5.17	-0.45	-1.70	-0.14	-0.37	2.26	6.40	2.07	5.61

Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo determinar soluções de intervenção para manter a posição atual da linha de costa em frente à praia de Quarteira, na zona do campo de esporões, promovendo preferencialmente o aumento da largura de praia também. No decorrer do trabalho foram discutidos os resultados da consideração de diferentes climas de agitação representativos das taxas de variação da posição da linha de costa e do transporte sólido longitudinal. O clima de agitação por fim adotado representa uma série cronológica de 50 anos, que resulta em caudais sólidos de transporte longitudinal próximos aos que se registam atualmente. A análise preliminar da sensibilidade do modelo à variação destes fatores permitiu definir, em consonância com as entidades envolvidas no estudo, oito cenários de intervenção que compreendem a eliminação de alguns esporões existentes e o prolongamento de outros, e a conjugação simultânea dessas ações com operações específicas de alimentações artificiais de sedimentos. Todos os cenários foram ainda repetidos considerando a subida do nível do mar por efeito das alterações climáticas.

Os resultados preveem o agravamento da situação de referência ao longo do horizonte das simulações, com tendência de perda de praia devido ao défice sedimentar existente. Esta tendência será potencialmente agravada pelo efeito da subida do nível médio do mar. No sentido de atingir o objetivo definido, os cenários isolados de reconfiguração do campo de esporões (C1 a C4) são menos eficientes do que os cenários que preveem a realização complementar de operações de alimentação artificial (C5 a C8). Particularmente, é mais eficiente efetuar a deposição sedimentar na zona restrita ao campo de esporões (cenários C5 e C7) do que duplicar a área de deposição para sotamar (cenários C6 e C8). Além disso, todos os cenários C5, C6 e C7 antecipam, na generalidade dos setores de análise, uma situação daqui a 50 anos melhor do que a atual, mesmo considerando a subida do nível do mar por efeito das alterações climáticas. Especificamente, o cenário C7, que conjuga a retirada dos esporões E1 e E3 e o prolongamento dos esporões E2 e E4 em 80 m com operações de alimentação artificial de praia no volume de 1 000 000 m³ a cada 10 anos na frente de Quarteira, é a intervenção para a qual se obtêm



maiores benefícios, incluindo no aumento da largura de praia. Conclui-se também que não há benefício em modificar a situação atual de proteção costeira apenas pelo aumento do espaçamento entre estruturas transversais (retirada de esporões), mesmo que se prolonguem os esporões remanescentes em 40 m ou 80 m, uma vez que se intensifica a erosão e os recuo da praia a sotamar dos esporões removidos devido à falta de sedimentos. Os resultados apresentados devem, no entanto, ser encarados como indicativos de comportamentos gerais, pelo que terão que atender à incerteza de previsão dos climas de agitação futuros e às limitações inerentes aos pressupostos de simplificação.

Referências Bibliográficas

- Almeida, L. P., Ferreira, Ó., Vousdoukas, M. I., Dodet, G. (2011). Historical Variation and Trends in Storminess along the Portuguese South Coast. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 2407-2417.
- Antunes, C., Catita, C., Rocha, C. (2018). Relatório Técnico-Científico: Estudo de Avaliação da Subida do Nível Médio do Mar e Sobrelevação da Maré em Eventos Extremos de Galgamento e Inundação Costeira do Município de Loulé. Instituto Dom Luiz, Universidade de Lisboa, 106p.
- CERC (1984). Shore Protection Manual, Vol. 1. DC: U.S. Army Corps of Engineers. Coastal Engineering and Research Center. U.S. Government Printing Office.
- Coelho, C. (2005). Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira. Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro, 405p.
- COSMO (2021). Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental. Acessível em: <https://cosmo.apambiente.pt/> (último acesso 31.05.2021)
- Costa, M., Silva, R., Vitorino, J. (2001). Contribuição para o Estudo do Clima de Agitação Marítima na Costa Portuguesa. 2.^{as} Jornadas Portuguesas de Eng. Costeira e Portuária, Sines.
- Dean, R. G. (1977). Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts. Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report n. 12, University of Delaware, 45p.
- 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 Syst. Sci. Data* 8, pp. 265-278. doi: 10.5194/essd-8-265-2016.
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., Aarninkhof, S. (2018) The state of the World's beaches. *Sci. Rep.* 8, 6641, pp. 1-11. doi: 10.1038/s41598-018-24630-6
- Puertos del Estado (2021). Puertos del Estado Online Service to Download Meteorological and Oceanographical Data. Acessível em: <http://www.puertos.es/> (último acesso 01.06.2021)
- Santos, F., Lopes, A., Moniz, G., Taborda, R., Ramos, L. (2014). Gestão da Zona Costeira: O Desafio da Mudança. Relatório do Grupo de Trabalho do Litoral; 237p.
- Teixeira, S. B. (2009). Demarcação do Leito e da Margem das Águas do Mar no Litoral Sul do Algarve. Administração da Região Hidrográfica do Algarve. Faro, 207p.
- Teixeira, S. B. (2010). Agravamento do Risco Associado à Erosão Costeira no Troço do Litoral entre Forte Novo e Garrão (Loulé). Nota Técnica. Faro, Portugal, 22p.
- Teixeira, S. B., Pinto, C. A. (2018). Efeitos na Dinâmica e Transporte Sedimentar, Caracterização de Manchas de Empréstimo e Exemplos de Aplicação no Âmbito de Operações de Alimentação Artificial de Praias. In: Coelho, C., Silva, P. A., Pinheiro, L. M. Gonçalves, D. S. (Eds). *Dragagens – Questões Ambientais e Monitorização*. Universidade de Aveiro, Artipol, pp. 169-184. ISBN 978-972-789-535-9.