



CARACTERIZAÇÃO DE TEMPESTADES E DA DERIVA LITORAL NO LITORAL DE AVEIRO, EM CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Margarida FERREIRA¹, Sandra FERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ², Carlos COELHO¹, Paulo A. SILVA²

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

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

RESUMO

A tendência regressiva que se observa no litoral português combinada com a prevista subida do nível médio da água do mar e a eventual alteração da frequência e intensidade de tempestades, causadas pelas alterações climáticas, coloca em risco pessoas e bens, obrigando a uma gestão fundamentada das zonas costeiras com o objetivo de proteger o património económico, social e ambiental. A gestão das zonas costeiras passa pela previsão das tendências futuras do regime de agitação marítima com o objetivo de se perceber como irão evoluir os eventos de tempestade e as taxas de transporte sólido de sedimentos (deriva litoral). Este trabalho apresenta os resultados de um estudo que teve como objetivos caracterizar os eventos de tempestade e o transporte sedimentar longitudinal na região costeira de Aveiro (trecho Barra-Vagueira, no Noroeste de Portugal), para diferentes cenários de alterações climáticas. O estudo apresentado permite concluir que os eventos de tempestade ainda que menos frequentes, serão mais intensos para os cenários de alterações climáticas considerados, e os valores líquidos do transporte sólido longitudinal de Norte para Sul tendem a ser menores no futuro.

Palavras-Chave: agitação marítima; transporte sedimentar longitudinal; modelação numérica; Barra-Vagueira

1. INTRODUÇÃO

A evolução da linha de costa nas zonas costeiras é dependente da relação dinâmica entre o volume de sedimentos que é transportado devido à ação da agitação marítima incidente, considerada o principal agente de transporte de sedimentos, e a disponibilidade de areias existentes (Antunes-Carmo, 2016). Em cenários de tempestade as zonas costeiras desempenham um papel fundamental na proteção de pessoas e bens, servindo de barreira à propagação dos riscos costeiros e absorvendo as ações energéticas do mar (Dias, 2005).

O clima de agitação ao longo do litoral português apresenta uma elevada capacidade energética, com valores elevados de deriva litoral, que associados à redução do fornecimento sedimentar devido à atividade antrópica promovem o agravamento dos fenómenos de erosão, refletindo-se numa situação generalizada de recuo da linha de costa e provocando em alguns locais uma perda significativa do território (Coelho, 2005; Veloso-Gomes, 2007, Santos *et al.*, 2014).

O presente estudo teve como objetivos principais prever as características de eventos futuros de tempestade na zona costeira de Aveiro e avaliar os impactos que as eventuais variações no clima de agitação marítima devido ao efeito das alterações climáticas provocam no transporte longitudinal de sedimentos. Foram considerados dois cenários de alterações climáticas, utilizando-se três séries de registos de ondas produzidas no âmbito do projeto de investigação MarRisk. Neste projeto, a MeteoGalicia realizou uma avaliação das tendências passadas, presentes, regimes médios e extremos de agitação marítima na costa Atlântica da Península Ibérica com recurso a diferentes modelos do projeto CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project 5*). Os resultados indicaram que o modelo MIROC5 (*Model for Interdisciplinary Research On Climate*) apresentava o melhor ajuste. Assim, os dados da agitação obtidos após a realização do *downscaling* dinâmico foram fornecidos para um ponto ao largo na região costeira de Aveiro (10°W 40.50°N). A primeira série, designada como Histórica, permitiu caracterizar o clima de agitação passado, contemplando 20 anos de registos (1981 a 2000). As séries futuras, designadas como RCP 4.5 e RCP 8.5 (RCP - *Representative Concentration Pathway*) caracterizam o clima de agitação futuro, correspondendo a 40 anos de dados (2026 a 2045 e 2081 a 2100).

2. EVENTOS DE TEMPESTADE

Metodologia

Os eventos de tempestade foram identificados nas séries temporais da agitação Histórica e futura, quando a altura significativa da onda superou os 4.7 m e enquanto os valores de altura significativa não foram inferiores a 3.5 m, seguindo o critério proposto por López-Olmedilla *et al.* (2019).

Resultados

Na série Histórica (1981-2000) foram identificados 364 eventos de tempestade enquanto no futuro próximo (2026-2045) foram identificados 321 e 347 eventos nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respetivamente. No futuro distante (2081-2100) foram identificados 292 e 264 eventos nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respetivamente. Na Tabela 1 são apresentados os valores médios das seguintes variáveis características de uma tempestade: altura significativa máxima (*Hs max*), período pico médio (*Tp médio*), direção média (*Θ média*), duração, *power storm index* (*PSI*) e potência (*P*) para um evento de tempestade média. No futuro observa-se um incremento na *Hs max* e uma mudança na direção média que fica mais rodada para o quadrante W-NW. Verifica-se também que os eventos irão ter uma maior duração e maior potência para o final do século, no cenário RCP 8.5. A potência acumulada dos eventos de tempestade da série histórica é de 1.54×10^9 Wh.m⁻¹, enquanto no cenário RCP 8.5 é de 1.35×10^9 e 1.29×10^9 Wh.m⁻¹, para o futuro próximo (2026-2045) e distante (2081-2100), respetivamente.

Tabela 1. Valores médios das variáveis características de um evento de tempestade

Série	<i>Hs max</i>	<i>Tp médio</i>	<i>Θ média</i>	<i>Duração</i>	<i>PSI</i>	<i>P</i>
	(m)	(s)	(°)	(horas)	(m ² .h)	(Wh.m ⁻¹)×10 ⁶
Histórica	6.16	12.92	302.08	69.83	3275.17	4.24
RCP 4.5 (2026-2045)	6.24	12.82	302.47	70.00	3445.63	4.26
RCP 4.5 (2081-2100)	6.31	12.57	299.73	66.29	3319.34	3.94
RCP 8.5 (2026-2045)	6.19	12.67	300.84	65.26	3023.77	3.89
RCP8.5 (2081-2100)	6.39	12.79	297.23	76.68	4265.62	4.88

3. TRANSPORTE SEDIMENTAR LONGITUDINAL

Metodologia

Com o objetivo de caracterizar o transporte sedimentar longitudinal foram adotadas duas abordagens de cálculo, uma analítica e outra numérica. Na primeira abordagem, o valor médio anual de transporte sólido de sedimentos foi avaliado considerando de forma simplificada os fenómenos de empolamento e de refração na propagação da onda (teoria linear, supondo uma batimetria regular e paralela) e admitindo a orientação da linha de costa no litoral de Aveiro como constante e igual a 15°N. Na segunda abordagem aplicou-se o modelo numérico de evolução da linha de costa LTC - *Long-Term Configuration*, desenvolvido por Coelho (2005), ao trecho costeiro Barra-Vagueira, que permitiu determinar o caudal sólido em três secções distintas ao longo da linha de costa (espaçadas de 4km). A base de modelação representa a topo-hidrografia do trecho costeiro, integrando na modelação as obras costeiras existentes (espórões e obras longitudinais aderentes). O modelo LTC procede à transformação das características da onda na propagação, atualizando a batimetria e a orientação da linha de costa em cada instante de cálculo (Coelho, 2005). Em qualquer das abordagens, o cálculo do transporte sólido de sedimentos foi realizado através da fórmula CERC, Eq. 1 (CERC, 1984) e como forçamento consideraram-se os dados de agitação marítima ao largo, referidos anteriormente. O coeficiente empírico *k* foi definido como 0.04, para que o valor de volume de transporte sólido médio anual da série Histórica na zona de estudo se aproximasse do valor da deriva potencial referido em Santos *et al.* (2014), e que corresponde a 1.1×10^6 m³.ano⁻¹.

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

Resultados

Na Tabela 2 são apresentados os resultados médios do transporte sólido para as diferentes séries de registos de ondas, com base nas duas metodologias de cálculo adotadas. A análise dos resultados permitiu verificar que, o transporte sólido longitudinal de sedimentos tende a decrescer nas séries futuras, por comparação com os valores obtidos para a série Histórica, sendo essa redução devida à diminuição do volume de sedimentos no transporte sólido longitudinal na direção Norte-Sul (N-S), uma vez que, o valor do transporte na direção Sul-Norte (S-N) é praticamente igual nas três séries de registos de ondas (Tabela 2 e Fig. 1). A justificação para a diminuição do transporte sólido nas séries futuras (séries RCP 4.5 e RCP 8.5) relaciona-se com o facto dos rumos de proveniência das ondas apresentarem uma maior dispersão no quadrante W-N, originando uma diminuição da frequência das ondas dos rumos que potenciam o maior transporte sólido de sedimentos, que no trecho em análise corresponde a um rumo ao largo de aproximadamente 33°N, no sentido antihorário (Fig. 2).

Comparando a evolução cronológica do transporte sólido obtido analiticamente e através do modelo numérico LTC (Fig. 1), constata-se que as duas abordagens de cálculo apresentam a mesma evolução de resultados, com ligeiras diferenças nos valores obtidos, sendo as diferenças atribuídas à orientação da linha de costa que no modelo numérico é atualizada em cada instante de cálculo e ao longo da linha de costa. Refere-se ainda que os resultados do modelo numérico nas 3 secções avaliadas ao longo da linha de costa indicam que o transporte longitudinal de sedimentos se intensifica na direção Norte-Sul.

Tabela 2. Valores médios do potencial de transporte sólido obtidos analiticamente ($\times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$)

Série	Cálculo analítico				Modelo numérico			
	N-S	S-N	Líquido	Bruto	N-S	S-N	Líquido	Bruto
Histórica	1.49	0.29	1.20	1.78	1.58	0.40	1.18	1.98
RCP 4.5 (2026-2045)	1.44	0.30	1.14	1.74	1.50	0.39	1.12	1.89
RCP 4.5 (2081-2100)	1.24	0.30	0.95	1.54	1.32	0.38	0.95	1.70
RCP 8.5 (2026-2045)	1.40	0.28	1.12	1.68	1.45	0.38	1.07	1.83
RCP8.5 (2081-2100)	1.15	0.32	0.83	1.47	1.26	0.44	0.82	1.70

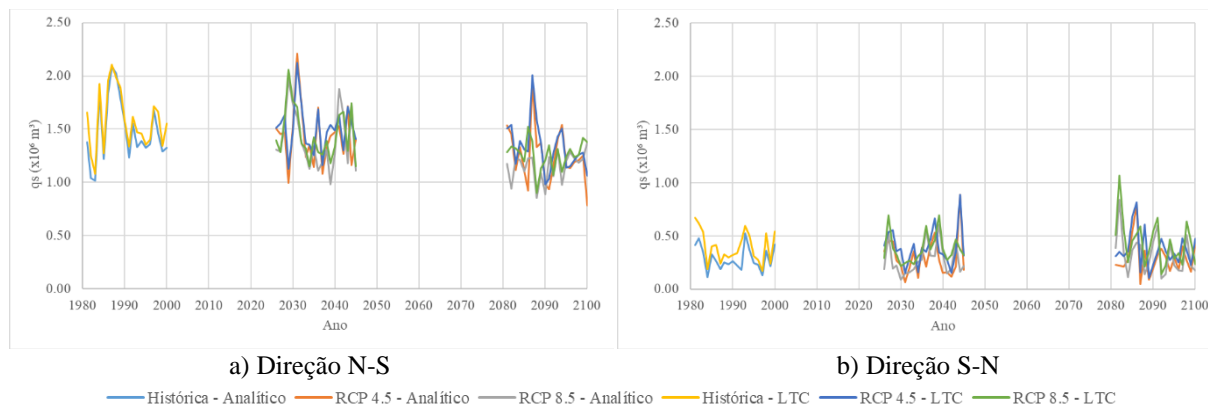


Fig. 1. Transporte sólido longitudinal ao longo do tempo

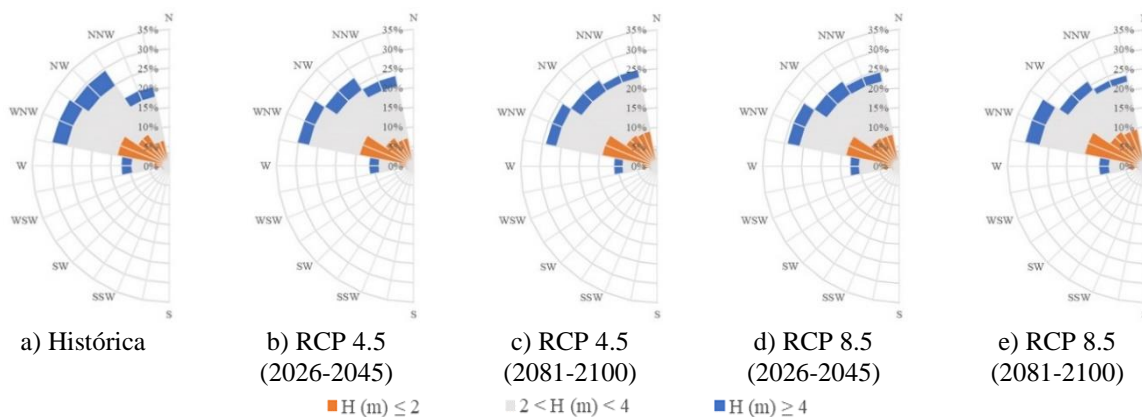


Fig. 2. Rosa de rumos de alturas de onda para as diferentes séries de registos de ondas

4. CONCLUSÕES

No estudo apresentado caracterizaram-se os eventos de tempestade e o transporte sedimentar longitudinal na região costeira de Aveiro (trecho Barra-Vagueira) para dois cenários de alterações climáticas. Os resultados obtidos permitem verificar que os eventos de tempestade nos cenários futuros irão ser menos frequentes, mas irão ser mais intensos, apresentando maiores valores de altura significativa, uma maior duração e uma maior potência. Além disso, é expectável uma mudança na direção mais frequente das tempestades, que transitará de NW-NNW para W-WNW. Por esse efeito (rumo de proveniência da agitação marítima apresenta uma maior dispersão no quadrante W-N, com menores frequências de tempestades nos rumos relacionados com os maiores caudais sólidos), o transporte longitudinal líquido de sedimentos ao longo da linha de costa irá ser menor no futuro, por comparação com os valores obtidos no passado. Os resultados do modelo numérico vão ao encontro dos obtidos analiticamente, permitindo também concluir que o transporte longitudinal de sedimentos se intensifica ao longo da linha de costa, de Norte para Sul.

AGRADECIMENTOS

O trabalho apresentado neste artigo foi realizado no âmbito do projeto MarRisk – Adaptação costeira às alterações climáticas: conhecer os riscos e aumentar a resiliência (0262_MarRISK_1_E) financiado através do programa EP-INTERREG V A Espanha-Portugal (POCTEP). Agradece-se à FCT pelo apoio financeiro ao CESAM (UID/AMB/50017/2019) através dos fundos nacionais FCT/MEC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antunes - Carmo, J. (2016). Processos Físicos e Modelos Computacionais em Engenharia Costeira. ISBN 978-989-26-1152-5, Imprensa da Universidade de Coimbra, 452 p.
- 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, 404 p.
- Dias, J. (2005). Evolução da Zona Costeira Portuguesa: Forçamentos Antrópicos e Naturais. Revista Encontros Científicos. Número 1, pp. 7-27.
- López-Olmedilla, L., Fontán-Bouzas, A., Silva, P.A., Fernández-Fernández, S. (2019). Assessment of the impact of Adrian Storm in W Portugal coast: Natural vs anthropized beaches. Libro de resúmenes X Jornadas de Geomorfología Litoral, Casteldefells (Barcelona), pp 157-160.
- 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.
- Veloso-Gomes, F. (2007). A Gestão da Zona Costeira Portuguesa. Revista de Gestão Costeira Integrada, pp 83-95.