

Modelos hidromorfodinâmicos para simulação de estuários em cenários ambientais futuros

Iglesias, I. (1); Pinho, J. L. (2); Bio, A. (1); Avilez-Valente, P. (1,3); Melo, W. (2);
Vieira, J. M. (2); Bastos, L. (1,4); Veloso-Gomes, F. (1,3)

(1) Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR), Universidade do Porto, Terminal de Cruzeiros de Leixões, Av. General Norton de Matos s/n, 4450-208 Matosinhos, Portugal
iiglesias@ciimar.up.pt.

(2) Centro do Território, Ambiente e Construção, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal.

(3) Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal

(4) Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Rua Campo Alegre 687, 4169-007 Porto, Portugal

Resumo: Os modelos numéricos são essenciais para simular a hidromorfodinâmica de sistemas estuarinos, permitindo antecipar os efeitos de intervenções antropogénicas, eventos extremos e alterações climáticas. Os modelos apresentam incertezas relacionadas com as simplificações físicas assumidas nas formulações e aproximações nas condições iniciais e nos forçamentos.

O projeto EsCo-Ensembles propõe a utilização de *ensembles* (conjuntos) de modelos numéricos para melhorar as previsões hidromorfodinâmicas em estuários. Foram considerados dois modelos – openTELEMAC-MASCARET e Delft3D – para representar estados atuais e futuros de dois estuários portugueses: Douro e Minho. Os resultados preliminares, obtidos para cenários de alterações climáticas, demonstram um agravamento do nível de inundações associado a eventos extremos e à subida do nível do mar, sem efeito perceptível no Douro, mas significativo no Minho, ainda que com alguma diferença entre modelos. A abordagem proposta melhorou a consistência das previsões, contribuindo para uma correta caracterização dos estuários estudados e da sua evolução futura.

Palavras-chave: alterações climáticas, estuários, eventos extremos, hidromorfodinâmica, modelos numéricos.

1. INTRODUÇÃO

As regiões estuarinas apresentam características de elevada importância estratégica sob os pontos de vista ambiental, económico e social. Para apoiar um crescimento sustentável, desenvolver bens e serviços, diminuir a vulnerabilidade a eventos extremos e promover a resiliência destas áreas, é crucial melhorar o conhecimento da sua dinâmica.

Infelizmente, esta dinâmica é normalmente pouco compreendida devido à complexidade dos sistemas e às suas especificidades, associada à falta de monitorização abrangente e sistemática. Os modelos numéricos podem contribuir para melhorar esse conhecimento e simular condições futuras com base em cenários predefinidos, incluindo eventuais efeitos de mudanças climáticas, de eventos extremos e de intervenções antrópicas. No entanto, os seus resultados podem apresentar elevada variabilidade e imprecisões, originando incerteza e afetando a confiança nos seus resultados. Para aferir e diminuir esta incerteza é sugerida a técnica de *ensembles* como uma ferramenta para diminuir eventuais erros na implementação de modelos e melhorar a sua precisão. Particularmente, no projeto EsCo-Ensembles é proposta a utilização desta técnica para

melhorar as previsões hidromorfodinâmicas para dois dos principais estuários portugueses: Douro e Minho.

2. ÁREAS DE ESTUDO

O estuário do rio Douro é um estuário urbano delimitado por duas grandes cidades: Porto e Vila Nova de Gaia. É um estuário estreito, altamente dinâmico, com regimes torrenciais que, por vezes, produzem fortes correntes e inundações severas que causam danos importantes às populações ribeirinhas e constrangimentos à navegação. A sua dinâmica é forçada principalmente por fluxos fluviais, sendo muito dependente das condições naturais altamente variáveis e da necessidade de produção de energia hidroelétrica das barragens construídas ao longo do percurso do rio. A construção de um quebra-mar destacado e a extensão do quebra-mar norte (por volta de 2008) na sua embocadura tem interferido nos padrões sedimentares e hidrodinâmicos locais. A restinga tornou-se mais robusta, com menor probabilidade de rotura durante eventos de cheias, pelo que se antevêm impactos mais severos de inundações a montante, com perdas económicas e

danos estruturais (Bastos *et al.*, 2012; Iglesias *et al.*, 2019a).

Em contrapartida, o estuário do rio Minho é um estuário menos urbanizado que apresenta uma grande diversidade de habitats. É por isso protegido por estatutos de conservação portugueses e espanhóis, apresentando um baixo nível de industrialização nas suas margens. Um dos principais problemas deste estuário é o forte assoreamento, relacionado com a elevada deposição de sedimentos favorecida pelas baixas velocidades de correntes. Os fluxos fluviais são determinados pelas descargas na barragem a montante que tem permitido reduzir a frequência e intensidade das cheias e consequentes inundações. Os padrões morfodinâmicos gerados pelo assoreamento têm causado restrições batimétricas à navegação, tal como o estrangulamento de vias de navegação, intensas variações de batimetria e o aparecimento de ilhas e bancos de areia que emergem durante a baixa-mar (Iglesias *et al.*, 2019a; Melo *et al.*, 2020).

3. MODELOS NUMÉRICOS

Os modelos numéricos selecionados para simular os estados atuais e futuros dos dois estuários descritos são o openTELEMAC-MASCARET (OTM) e o Delft3D. Estes modelos, já validados em Iglesias *et al.* (2019a), Iglesias *et al.* (2019b) e Melo *et al.* (2020), têm demonstrado capacidade de representar com precisão os padrões hidrodinâmicos estuarinos

e os níveis de elevação da superfície da água durante eventos extremos.

Neste trabalho foram simulados os cenários apresentados na Tabela I. Para a definição destes cenários foram calculados caudais de ponta de cheia para períodos de retorno de 100 e 1000 anos, assumindo-se que as distribuições de probabilidade dos caudais em Foz do Mouro (Minho) e Crestuma (Douro) seguem a distribuição de Gumbel. Não foram consideradas eventuais alterações nos caudais de ponta de cheia decorrentes de alterações das condições futuras de precipitação na bacia ou na operação das barragens durante eventos extremos. De facto, as condições de operação das barragens durante a ocorrência de cheias são atualmente condicionantes para os valores dos fluxos fluviais, pelo que se entende razoável não considerar nesta fase da investigação, eventuais alterações devido a alterações climáticas nos caudais fluviais extremos. A elevação na fronteira oceânica foi introduzida como valor constante, considerando os valores extremos de nível do mar calculados por Voudoukas *et al.* (2017) para as projeções dos cenários de emissão de gases com efeito estufa RCP 4.5 e 8.5 para o horizonte temporal de 2100. Os valores extremos de nível do mar incluem o efeito de subida do nível médio do mar, a maré, a agitação (*wave set-up*) e a sobrelevação meteorológica. Os resultados das simulações são processados quando se atinge um regime permanente.

Tabela I: Simulações numéricas

Simulação	Período de retorno (anos)	Caudal (m ³ /s)		Cenário	Elevação na fronteira oceânica (m)
		Minho	Douro		
S1	100	6037.7	17634	Histórico	3.0
S2		6037.7	17634	RCP 4.5 2100	3.5
S3		6037.7	17634	RCP 8.5 2100	3.7
S4	1000	8262.13	24629	Histórico	3.3
S5		8262.13	24629	RCP 4.5 2100	3.7
S6		8262.13	24629	RCP 8.5 2100	4

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos demonstraram uma diferença assinalável entre os dois estuários no comportamento devido à elevação do nível do mar associado às alterações climáticas.

O estuário do rio Douro apresenta campos de velocidades com poucas variações quando comparados com as simulações que consideraram valores históricos de elevação na fronteira oceânica e o mesmo caudal imposto (S1 vs. S2 e S3; S4 vs. S5 e S6). As diferenças resultam do caudal imposto, com diferença na intensidade da corrente na zona

entre o molhe norte e o quebra-mar destacado, assim como no interior do estuário (Fig. 1). A comparação entre os modelos mostra que o comportamento é muito semelhante, em termos de distribuição e magnitude da velocidade, só apresentando alguma diferença sobre a restinga, já que o Delft3D mostra galgamento desta estrutura para os dois caudais fluviais considerados, enquanto o OTM só apresenta galgamento para caudais fluviais associados a períodos de retorno de 1000 anos. Quando analisada a elevação da superfície livre, o comportamento é muito similar, sendo praticamente constantes os valores para os cenários que apresentam o mesmo período de retorno, surgindo as diferenças quando

são considerados caudais distintos (Fig. 2). Os dois modelos apresentam resultados similares na distribuição da elevação mas com uma diferença média de 1 m.

No estuário do rio Minho as velocidades apresentam também um comportamento semelhante às obtidas no estuário do rio Douro, com diferenças associadas ao caudal e não tanto à elevação imposta na fronteira oceânica. As diferenças são mais significativas nas zonas mais estreitas do estuário (embocadura e áreas a montante e jusante da ilha da Boega, Fig. 3). A comparação entre os dois modelos não revela diferenças significativas entre os resultados obtidos.

Analisando os resultados relativos à elevação do nível do mar imposta nos cenários considerados, estes evidenciam uma diferença entre os distintos níveis associados com as alterações climáticas. Este efeito é mais claro no baixo estuário, a jusante da ilha da Boega (~8.5 km, Fig. 4a). Esta diferença deve-se aos caudais de cheia mais baixos nesta bacia, mas também à própria morfologia estuarina com o alargamento do estuário a montante da foz.

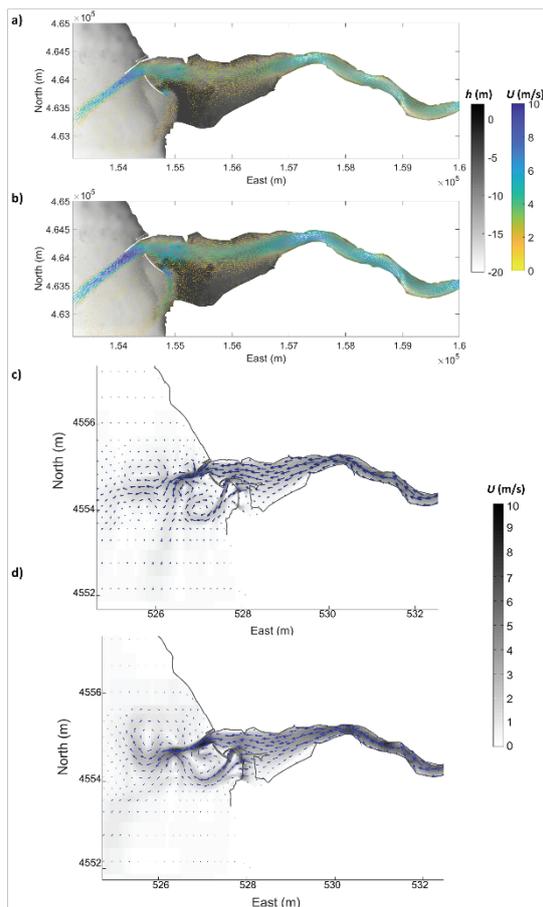


Fig. 1. Campos de velocidade (m/s) no estuário do Douro para a) cenário S3 – OTM, b) cenário S6 – OTM, c) cenário S3 – Delft3D, d) cenário S6 – Delft3D.

Este alargamento permite escoamentos intensos com menor sobrelevação da superfície livre, fazendo com que as correntes sejam menos intensas que as que ocorrem no estuário do rio Douro. No interior do estuário, com o OTM, verificam-se aumentos na elevação da zona interior do estuário entre 0.4 m e 0.6 m para as simulações dos cenários RCP 4.5 e 8.5, respetivamente, quando comparadas com as elevações das simulações históricas e considerando o caudal associado ao período de retorno dos 100 anos (cenários S1, S2 e S3). Para os cenários S4, S5 e S6, obtêm-se elevações em torno dos 0.3 m e 0.5 m para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respetivamente. Com o modelo Delft3D estas variações são ligeiramente inferiores mas da mesma ordem.

As elevações obtidas com os dois modelos apresentam pois certas diferenças, resultado do processo de calibração distinto e dos respetivos valores dos parâmetros de calibração adotados em cada um dos modelos.

Encontra-se em desenvolvimento a elaboração de novas versões dos dois modelos de modo a que se possam aproximar os respetivos resultados e assim aplicar a técnica de *ensembles* proposta em Iglesias *et al.* (2019a). Isto será feito por via da adoção de valores de parâmetros de calibração idênticos nos dois modelos de forma a fornecer uma única previsão do efeito das alterações climáticas para os dois estuários estudados.

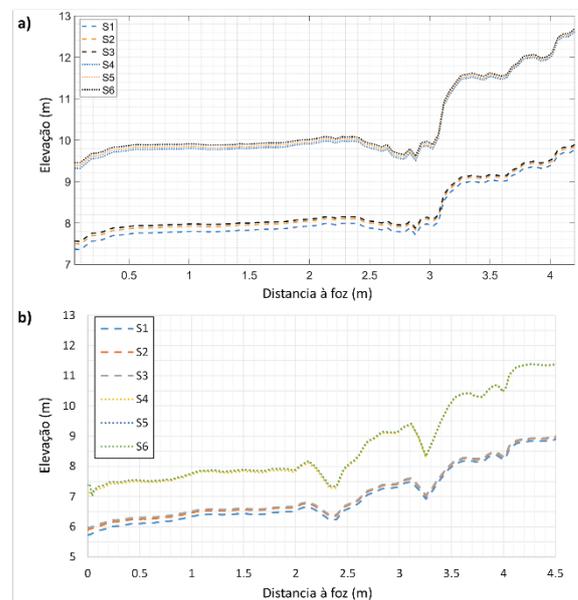


Fig. 2. Elevação da superfície livre (m) para um perfil longitudinal entre a boca do estuário e a Ponte Luíz I: a) OTM, b) Delft3D.

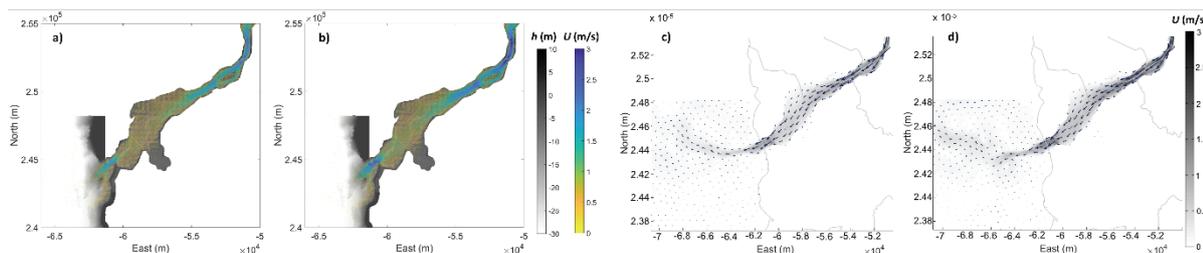


Fig. 3. Campos de velocidade (m/s) no estuário do Minho para a) cenário S3 – OTM, b) cenário S6 – OTM, c) cenário S3 – Delft3D, d) cenário S6 – Delft3D

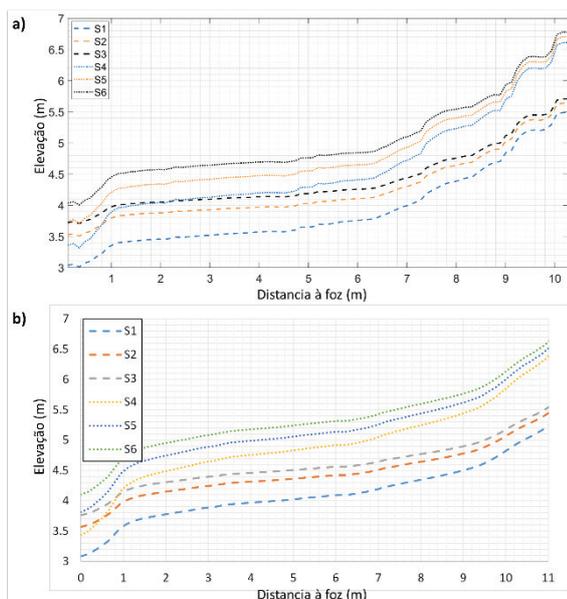


Fig. 4. Elevação da superfície livre (m) para um perfil longitudinal entre a boca do estuário e 1 km ao montante da ilha da Boega: a) OTM, b) Delft3D.

5. CONCLUSÕES

Os resultados preliminares obtidos no âmbito do projeto EsCo-Ensembles para diferentes cenários de alterações climáticas têm demonstrado situações diferentes para o estuário do rio Douro e para o estuário do rio Minho. Para o estuário do rio Minho foi demonstrado que o aumento médio do nível do mar reduzirá a velocidade das correntes mas aumentará as áreas inundadas devido a este estuário ser dominado pela componente marítima. Por isso, é esperado um agravamento significativo do nível de inundação associado a eventos extremos e à subida do nível do mar neste estuário. Este efeito é atenuado no estuário do rio Douro quando se considera a ocorrência de cheias, visto que se trata de um estuário onde a componente fluvial é mais importante que a marítima quando são considerados altos caudais. Não obstante, as simulações de cheias propostas para o estuário do Douro mostram que os caudais simulados podem produzir perdas económicas e danos materiais nas suas margens.

A técnica dos *ensembles*, já aplicada em Iglesias *et al.* (2019a), tem demonstrado que esta abordagem

melhora a consistência das previsões contribuindo para uma correta caracterização hidromorfoodinâmica atual dos estuários estudados. Esta técnica será aplicada após o afinamento dos modelos, fornecendo uma única solução para representar a sua evolução futura e o efeito dos eventos extremos e das alterações climáticas nestas duas regiões estuarinas.

Agradecimentos

Ao fundo estratégico UIDB/04423/2020 e UIDP/04423/2020 através de fundos nacionais fornecidos pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER). Ao projeto EsCo-Ensembles (PTDC/ECI-EGC/30877/2017), cofinanciado pelo NORTE 2020, Portugal 2020 e pela UE através do FEDER, e pela FCT através de agências nacionais. À EDP e à Confederación Hidrográfica Miño-Sil pelos dados fornecidos.

REFERÊNCIAS

- Bastos, L., Bio, A., Pinho, J.L., Granja, H., da Silva, A. (2012). Dynamics of the Douro estuary sand spit before and after breakwater construction. *Estuarine and Coastal Shelf Science*, 109, 53–69.
- Iglesias, I., Venancio, S., Pinho, J.L., Avilez-Valente, P. e J. Vieira (2019a). Two models solutions for the Douro Estuary: flood risk assessment and breakwater effects. *Estuaries and Coasts*, 42(2), 348-364.
- Iglesias, I., Avilez-Valente, P., Bio, A. e Bastos L. (2019b). Modelling the main hydrodynamic patterns in shallow water estuaries: The Minho case study. *Water*, 11(5), 1040, 1-25.
- Melo, W., Pinho, J., Iglesias, I., Bio, A., Avilez-Valente, P., Vieira, J., Bastos, L. e Veloso-Gomes, F. (2020). Hydro- and Morphodynamic Impacts of Sea Level Rise: The Minho Estuary Case Study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(6), 441.
- Vousdoukas, M.I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M. e Feyen, L. (2017). Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earth's Future*, 5, 304-323.