

Revista de Gestão Costeira Integrada

Journal of Integrated Coastal Zone Management

Avaliação de taxas de assoreamento no estuário do rio Sado

Paulo Leitão^{@1}, Adélio Silva¹, João Ribeiro¹, Ernesto Carneiro², João Pinto²

[@] Corresponding author: paulo.chambel@hidromod.com

¹ Hidromod

² Administração dos Portos de Setúbal e Sesimbra, SA

RESUMO: Neste trabalho é efetuada uma avaliação das taxas de assoreamento associadas a sedimentos finos no interior do estuário do rio Sado mais especificamente na zona adjacente ao cais da Teporset. Estas taxas são estimadas a partir de levantamentos batimétricos e recorrendo ao modelo numérico MOHID, tendo-se observado uma grande concordância entre a variabilidade espacial e intensidade das taxas de assoreamento obtidas pelos dois métodos, que apontam para valores da ordem de 30-60 cm/ano na área junto ao cais. O modelo numérico foi corrido utilizando uma abordagem de modelos encaixados que permite resolver os processos de transporte de sedimentos finos na zona de interesse com uma resolução de 20 m. Os levantamentos batimétricos focados na monitorização de canais de navegação não substituem campanhas de medidas *in situ* focadas na caracterização da dinâmica sedimentar e o trabalho complementar em laboratório. No entanto, podem ser uma boa primeira aproximação para verificar se taxas de assoreamento obtidos com um modelo numérico são consistentes em termos de variabilidade espacial e ordem de grandeza, em especial em zonas com forte assoreamento.

Palavras-chave: Estuário do rio Sado, sedimentos finos, taxas de assoreamento, levantamentos batimétricos, modelação, MOHID.

ABSTRACT: In this work, an evaluation is made of silting rates associated with fine sediments in the Sado river estuary interior, more specifically in the area adjacent to the Teporset pier. These rates are estimated from bathymetric surveys and using the MOHID numerical model. The silting rates obtained by the two methods are similar, which point to values in the order of 30-60 cm/year in the pier area. The numerical model was run using a nesting approach that allows solving the transport processes of fine sediments in the area of interest with a resolution of 20 m. Bathymetric surveys focused on monitoring navigation channels are no substitute for *in situ* measurement campaigns focused on the characterization of sedimentary dynamics and complementary laboratory work. However, they can be a good first approximation to verify if silting rates of fine sediments obtained with a numerical model are consistent in terms of spatial variability and order of magnitude, especially in areas with strong silting.

Keywords: Sado river estuary, fine sediments, silting rates, bathymetric surveys, modelling, MOHID.

1. INTRODUÇÃO

As dragagens de canais de navegação e manobra implicam em geral alterações da hidrodinâmica e podem ter consequências no transporte de sedimentos. Dependendo do desenho do canal e das condições hidrodinâmicas locais, o esforço de manutenção poderá assumir valores muito variáveis (Van Rijn, 2013). Por conseguinte, a sua execução deve ser sempre acompanhada de estudos detalhados que permitam suportar o respetivo projeto e posteriormente quantificar as consequências da intervenção no meio físico. Os modelos matemáticos (hidrodinâmica e transporte de sedimentos) são uma componente fundamental no desenho otimizado de canais de navegação (Silveira *et al.*, 2017), contribuindo decisivamente para uma melhor compreensão dos fenómenos envolvidos, permitindo tomar decisões ao nível das soluções de engenharia e efetuar uma análise dos impactes associados através duma descrição com grande detalhe espacial e temporal dos processos marinhos e, em particular, dos processos sedimentares.

A modelação tem, assim, sido uma ferramenta muito complementar das várias técnicas de medição *in situ* (Franz *et al.*, 2014) e remotas (Brito, 2005) que têm surgido nas últimas décadas. No entanto, devido ao elevado custo normalmente associado aos programas de monitorização torna-se difícil quantificar algumas das componentes dos processos do transporte de sedimentos. A necessidade que as autoridades portuárias têm de monitorizar (levantamentos batimétricos multifeixe) com elevada discretização temporal (da ordem dos meses) e espacial (da ordem dos metros) a evolução dos canais de acesso às infraestruturas portuárias pode ser uma excelente oportunidade para validar taxas de assoreamento obtidas com modelos numéricos.

Neste trabalho apresenta-se uma avaliação de taxas de assoreamento anuais associadas a sedimentos finos (diâmetro inferior a 62.5 µm) com base em levantamentos batimétricos para a zona portuária mais interior do estuário do Sado (área adjacente ao cais da Teporset). Adicionalmente são apresentados resultados do modelo MOHID (<http://www.mohid.com>) que tem sido utilizado em diversos estuários um pouco por todo o mundo. A empresa HIDROMOD, desde a sua formação há 27 anos, tem sido um parceiro particularmente ativo no desenvolvimento deste modelo.

O modelo hidrodinâmico MOHID foi calibrado para o estuário do Sado no âmbito de diversos estudos de consultoria e investigação (Neves 1985, Martins *et al.*, 2001 e Martins *et al.*, 2002). No que respeita à modelação do transporte de sedimentos finos em sistemas estuarinos a validação, do modelo MOHID, apresentada na literatura científica tem sido feita essencialmente com

base em dados de turbidez (sensores *in situ* ou remotos) e amostras de concentração de matéria particulada na coluna de água (Cancino & Neves, 1995, Brito 2008 e Franz *et al.*, 2014), existindo assim uma lacuna ao nível da validação das taxas de assoreamento. Este trabalho constitui um primeiro passo para preencher essa lacuna.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é o estuário do rio Sado com especial enfoque na área adjacente ao cais da Teporset (Figura 1) onde o assoreamento tende a ser dominado por sedimentos finos. Trata-se de uma área monitorizada com alguma regularidade pela Autoridade Portuária do Porto de Setúbal (APSS), por ser uma área com uma atividade portuária relevante. Desde do ano 2000 existem levantamentos batimétricos efetuados pela APSS com uma frequência pelo menos anual entre 2000 e 2017 (Figura 2), focados nos canais de navegação.

2.1 Caracterização sedimentar do estuário do rio Sado

Segundo Andrade *et al.* (2006) o estuário interno evolui no sentido da acreção. Este autor por diferenças de levantamentos batimétricos conclui que entre 1979-2002 no estuário interno a montante da área de interesse neste período o assoreamento foi de ~10 mm/ano. Rodrigues (1992) caracteriza de uma forma global os sedimentos de fundo do estuário do rio Sado e adicionalmente descreve a variabilidade da concentração de sólidos suspensos totais na coluna de água tanto no tempo como no espaço. Em sistemas estuarinos com as características do estuário do rio Sado a concentração de sólidos suspensos totais é aproximadamente igual à concentração de sedimentos finos. Segundo Rodrigues (1992) os sedimentos de fundo do estuário do Sado são fundamentalmente areias médias a grossas com uma percentagem de sedimentos finos relativamente baixa (~25%). A exceção são bolsas de sedimentos finos (ou lodo) que se encontram ao longo de toda a margem Norte ou na embocadura do canal de Alcácer (Figura 3). A zona de interesse deste trabalho encontra-se contida numa dessas bolsas de sedimentos finos onde a sua percentagem relativamente ao sedimento total é superior a 75%. Uma caracterização dos sedimentos de fundo na zona de interesse feita em 2006 revela valores junto ao cais que variam entre 75-100% (Gaudêncio *et al.*, 2006).

Rodrigues (1992) apresenta também uma caracterização espacial e temporal da concentração de sedimentos finos na coluna de água. Os resultados mostram que os valores médios tendem a aumentar para montante. Quanto mais próximo do canal de Alcácer maior são as concentrações médias.



Figura 1. Localização do cais da Teposert. Um cais de 152 m de comprimento (1 posto de atracação), que permite a atracação de navios até 200 m de comprimento, até 10 m de calado (fonte: <https://www.portodesetubal.pt/>).

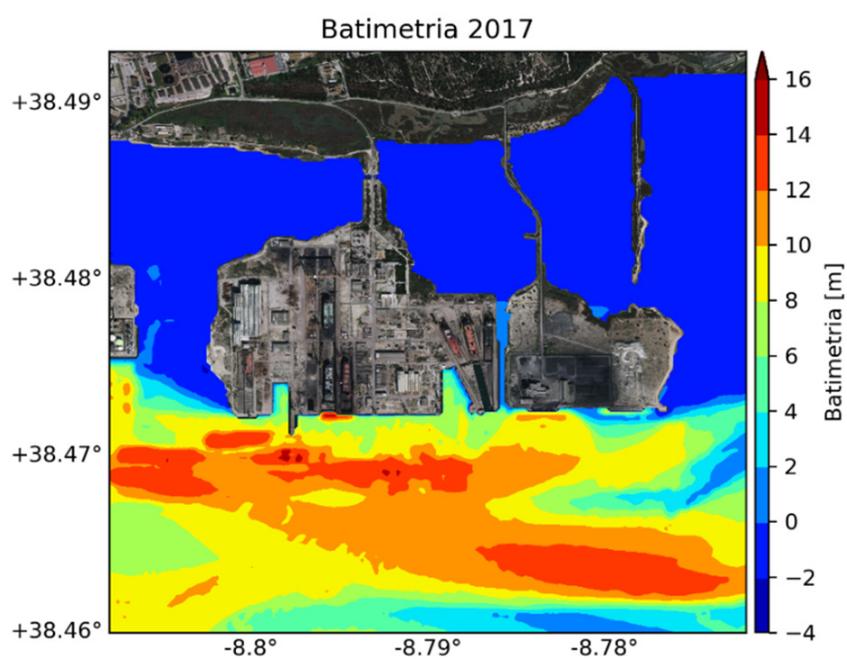


Figura 2. Batimetria elaborada com base nos levantamentos mais recentes disponíveis para o ano de 2017. Localização assinalada com um quadrado a tracejado branco na Figura 1.

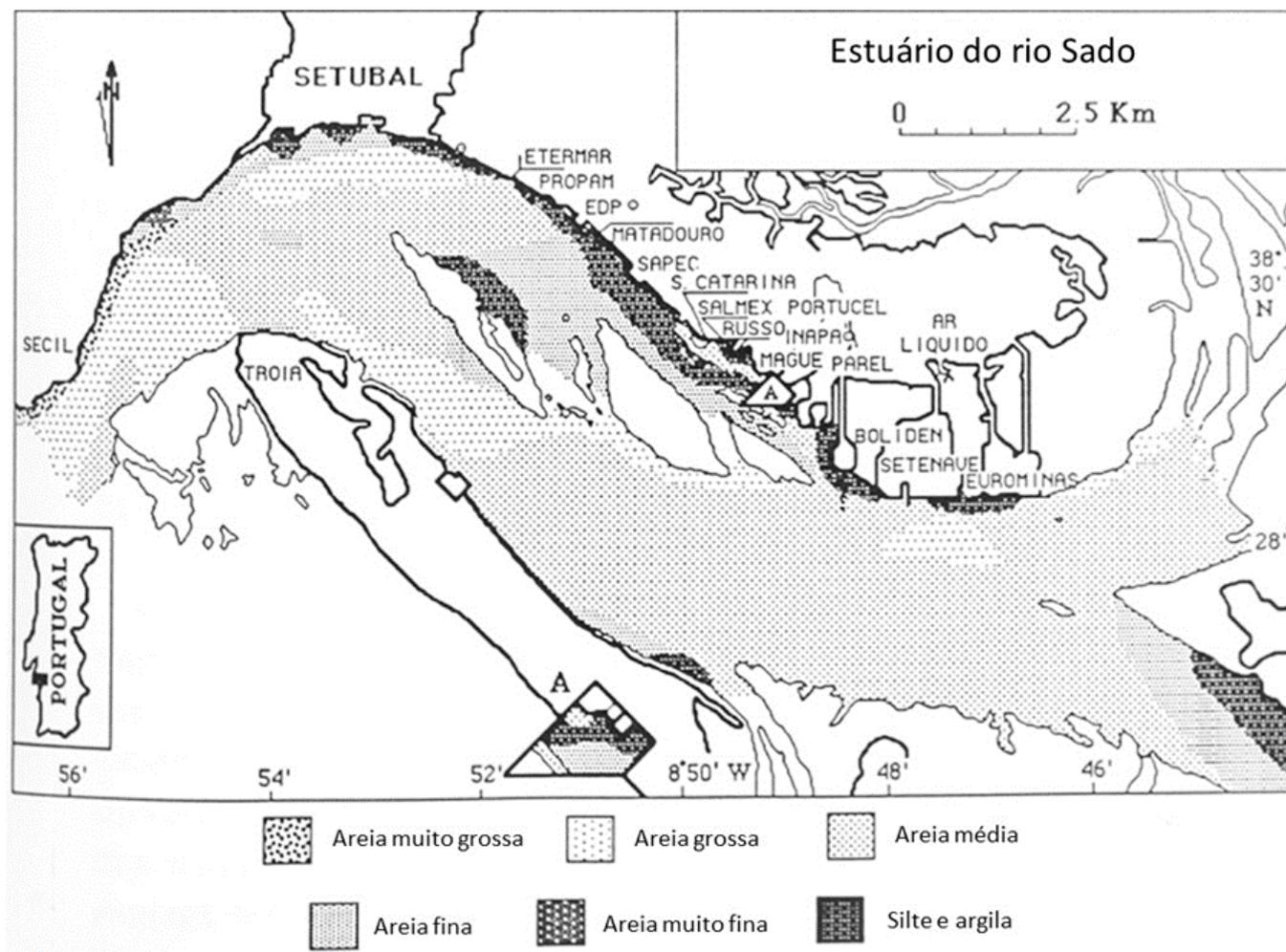


Figura 3. Estuário do rio Sado. Classificação e distribuição espacial dos sedimentos de fundo (adaptado de Rodrigues, 1992).

Na zona de interesse as concentrações variam entre 10 mg/L e 45 mg/L. A amostragem feita teve uma base mensal não sendo possível detetar com base nos dados nenhum tipo de variabilidade sazonal. É expectável que os valores de concentração de sedimentos finos sejam controlados de forma persistente pelo ciclo de maré viva-maré morta como acontece no estuário do Tejo (Franz *et al.*, 2014). Afluências intensas de água fluvial tenderão a perturbar este controlo por parte da maré.

3. METODOLOGIA

Tendo por base as características dos sedimentos do fundo (Rodrigues, 1992 e Gaudêncio *et al.*, 2006) assumiu-se que o assoreamento na zona de interesse é maioritariamente controlado pelos sedimentos finos. A implementação do modelo foi focada exclusivamente no transporte de sedimentos finos (ou coesivos) induzido pelas correntes e ondas geradas no interior do estuário por ação do vento local. A metodologia pode-se considerar igual à proposta por Franz *et al.* (2014) para o estuário do Tejo.

3.1 Sistema MOHID

A modelação numérica do Estuário do Sado baseada no sistema MOHID foi alvo de diversos artigos científicos onde se aborda de forma extensiva a componente relativa à validação hidrodinâmica (e.g. Neves, 1985, Martins *et al.*, 2001, Martins *et al.*, 2002). Adicionalmente, o sistema MOHID tem sido corrido diariamente em modo de previsão ao longo dos últimos 5 anos, tendo assim possível acumular uma experiência única na simulação dos processos mais relevantes no estuário do Sado. Este sistema operacional disponibiliza previsões atmosféricas e previsões de variáveis que caracterizam o meio marinho (e.g. meteorologia, correntes, níveis, e ondas - ver <http://portodesetubal.aquasafeonline.net/>).

Atualmente este sistema de modelação tem na sua base um modelo que inclui toda a costa Portuguesa. Encaixado neste modelo é corrido um segundo nível que inclui o estuário do Tejo e a zona costeira que vai de Tróia até à Nazaré e um terceiro nível focado no estuário do Sado (Figura 4).

Por sua vez este modelo do estuário pode incluir subníveis mais detalhados como é o caso da zona próxima do cais da Teporset (Figura 5).

3.2 Configuração do modelo

O modelo MOHID foi configurado seguindo a metodologia descrita em Franz *et al.* (2014). O modelo foi corrido ao longo de 2 meses depois do período de *spin up*. Considerou-se no transporte de sedimentos finos o efeito das correntes induzidas pela maré astronómica e o efeito da agitação local. Assumiu-se que a maré é o principal mecanismo que condiciona a variabilidade da concentração de sedimentos por esta razão considera-se que uma simulação de 2 meses pode ser representativa de 1 ano médio. As taxas de assoreamento anuais são obtidas multiplicando por 6 os resultados da simulação de 2 meses.

Foram feitos testes onde se considerou uma discretização vertical sigma com 10 camadas (3D) e 1 camada (2D). No entanto, as diferenças entre as duas abordagens (2D e 3D) não produziram resultados significativamente diferentes.

Por uma questão de eficiência computacional optou-se pela abordagem 2D. Os parâmetros principais que controlam o cálculo da erosão e deposição dos sedimentos finos foram assumidos iguais aos considerados por Franz *et al.* (2014):

- Tensões de corte crítica de deposição - 0.2 Pa;
- Tensão de corte crítica de erosão - 0.4 Pa;
- taxa de erosão - 0.05 g/m²/s;
- velocidade de sedimentação função da concentração de sedimentos.

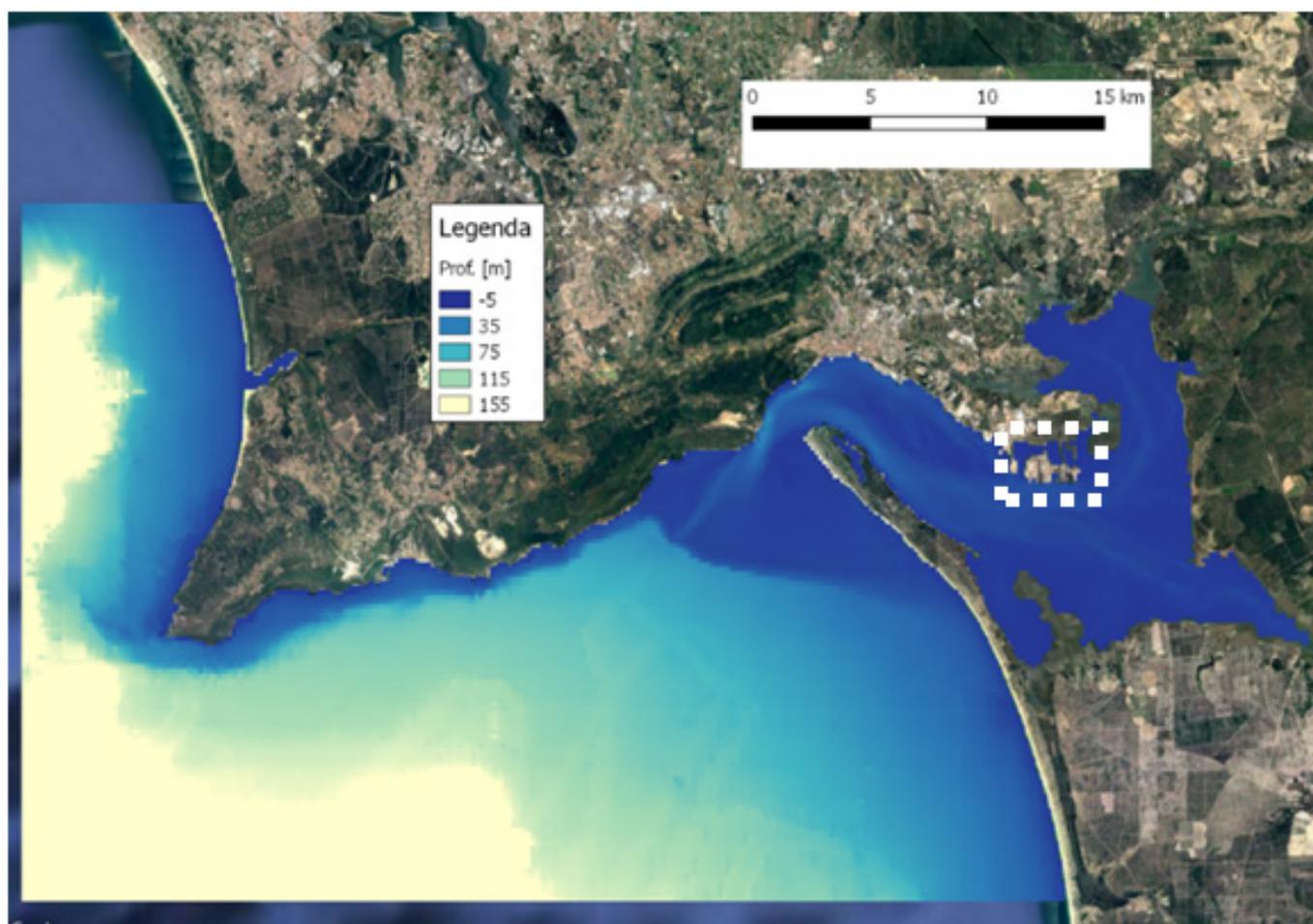


Figura 4. Domínio do Estuário do Sado (180 m de resolução).

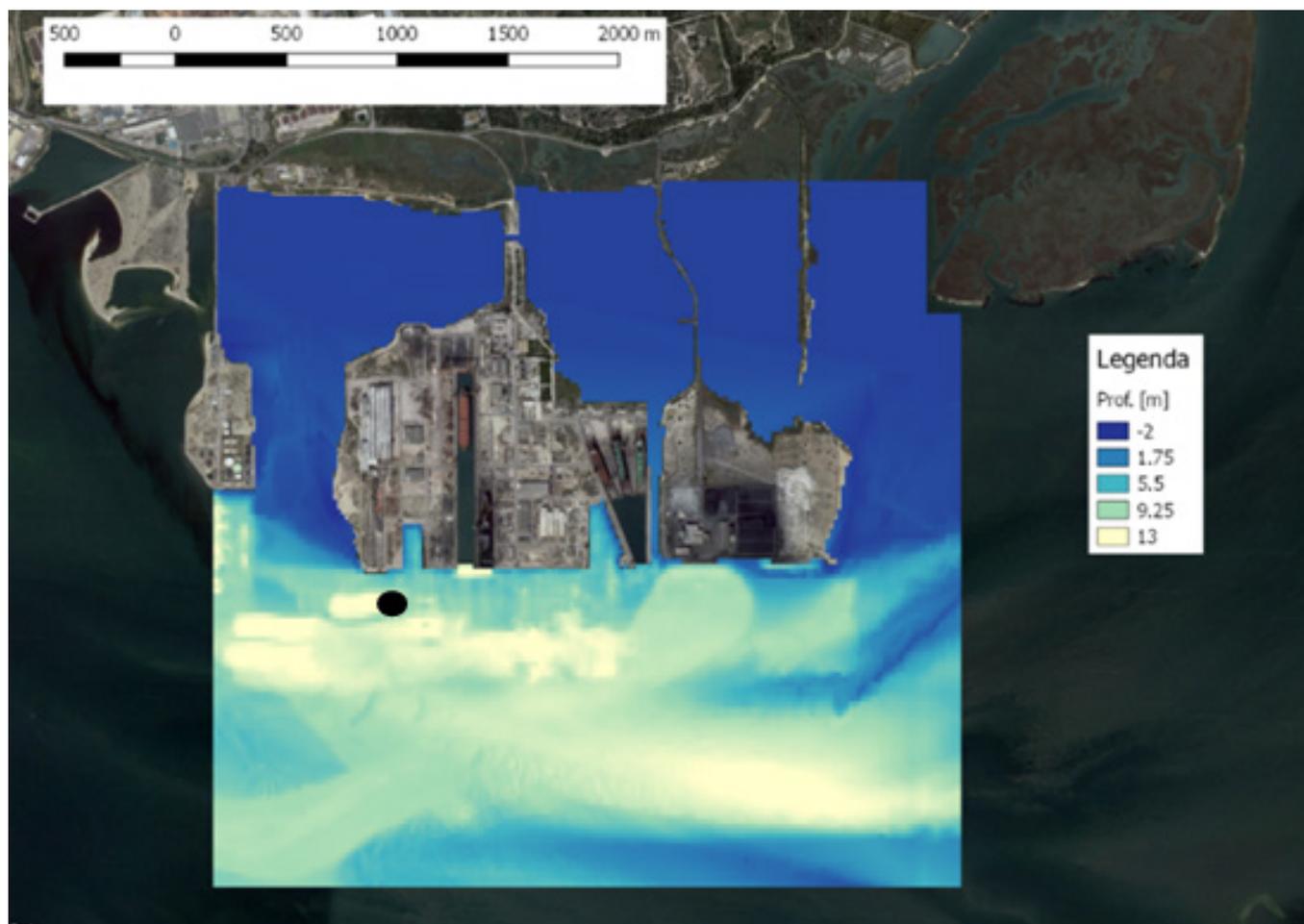


Figura 5. Domínio utilizado no modelo que permite descrever os processos hidrodinâmicos focado na zona de interesse (20 m de resolução). Localização assinada com um quadrado a tracejado branco na Figura 4. Ponto negro representa o local onde foi extraída uma série temporal de nível e concentração de sedimentos finos.

4. RESULTADOS

Numa primeira fase foi estimado o assoreamento para a zona de interesse tendo por base os levantamentos batimétricos disponíveis. De seguida os resultados do modelo foram validados qualitativamente à escala do estuário tanto em termos de variabilidade temporal como espacial. Finalmente é feita uma validação quantitativa dos resultados de assoreamento de sedimentos finos obtidos com o modelo de alta resolução para a zona de interesse.

4.1 Análise dos levantamentos

Os dados batimétricos disponíveis foram compatibilizados tendo em atenção os diferentes referenciais e resoluções no sentido de criar uma compilação integrada de todos os levantamentos. Devido ao trabalho persistente de dragagem não existem longos períodos em que o único factor de evolução do fundo sejam exclusivamente os processos de erosão e deposição. No entanto, em conjunto com os técnicos da APSS, foi identificado o período entre

2016 e 2017 em que não foram realizadas dragagens e existem levantamentos de grande qualidade. A partir da diferença dos dois levantamentos foi possível estimar para a zona de sobreposição dos levantamentos (linha branca a tracejado - Figura 6) taxas de assoreamento máximas da ordem de 30-60 cm/ano na zona adjacente ao cais (Figura 6). Estes valores devem ser considerados com alguma prudência porque segundo a IHO (2019) para valores de profundidade de 8-10 m (área de interesse, ver Figura 5) a incerteza dos levantamentos deve ser inferior a 0.26 m em áreas onde é crítico o conhecimento do pé de piloto disponível. A precisão recomendada pelas normas internacionais para os levantamentos batimétricos deste tipo está muito próxima das diferenças observadas entre os dois levantamentos (Figura 6).

4.2 Variabilidade temporal

A evolução temporal da concentração de sedimentos finos obtida ao longo dos dois meses de simulação para a zona de interesse mostra valores máximos da ordem de

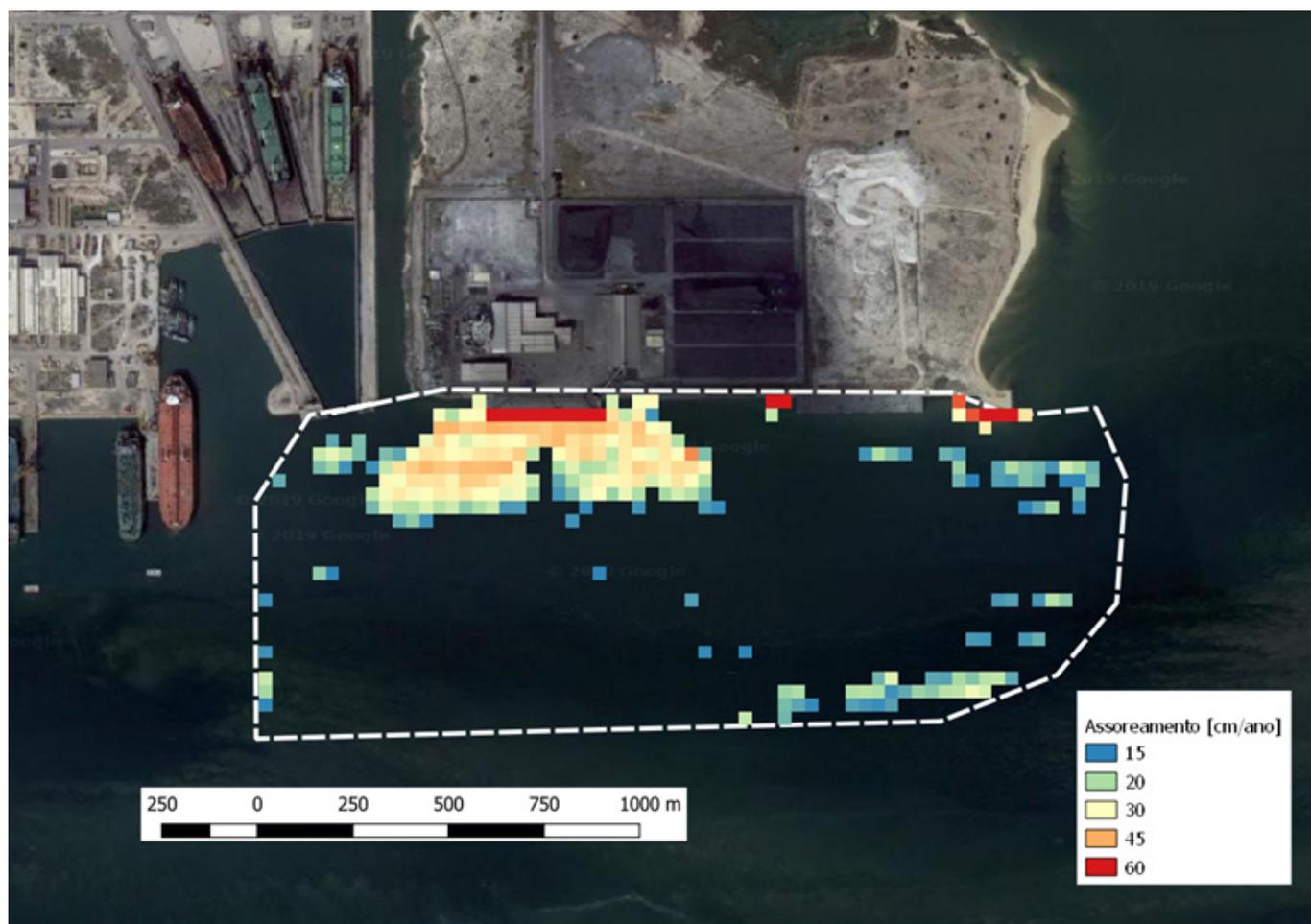


Figura 6. Diferença entre os levantamentos de 2016 (Primavera) e de 2017 (Primavera).

50 mg/L, mínimos de 5 mg/L e um valor médio da ordem de 25 mg/L (Figura 7). Estes valores estão de acordo com os dados de campo apresentados por Rodrigues (1992). A variabilidade das concentrações e sedimentos finos é condicionada de forma dominante pelo ciclo de maré viva-maré morta (Figura 7) o que também ocorre no estuário do Tejo (Franz *et al.*, 2014).

4.3 Deposição de sedimentos finos à escala do estuário

Em termos de assoreamento começou por ser efetuada uma comparação qualitativa, à escala do estuário, das zonas que apresentam taxas de assoreamento de sedimentos finos não-consolidados mais intensas (Figura 8) com as zonas onde a caracterização dos sedimentos de fundo feita por Rodrigues (1992) identifica como sendo de “Siltes e Argilas” (Figura 3). A margem Norte do estuário surge como a zona onde ocorrem mais bolsas onde o sedimento do fundo se pode considerar fino (siltes + argilas).

A diferença de levantamentos entre 2016-2017 (Figura 6) permitiu validar quantitativamente os resultados de

assoreamento de sedimentos finos calculados pelo modelo verificando-se igualmente uma boa correspondência com a caracterização de Rodrigues (1992).

Van Rijn (2015) refere que os sedimentos aprisionados em docas ou canais consistem em sedimentos finos com uma percentagem de matéria orgânica limitada e com uma massa volúmica de 1100 to 1200 kg/m³. A caracterização superficial dos sedimentos de fundos feita por Gaudêncio *et al* (2006) está em conformidade com esta hipótese apontando para valores de densidade dos sedimentos de fundo na zona de interesse da ordem dos 1200 kg/m³. Assumindo esta densidade, os resultados do modelo apresentam valores de 20-30 cm/ano na zona próxima ao cais (Figura 9). Caso se considere um valor mais conservativo de 1100 kg/m³ a taxa de assoreamento será de 30-60 cm/ano (Figura 10). As taxas de assoreamento obtidas a partir dos levantamentos batimétricos (Figura 6) têm uma distribuição espacial muito semelhante às obtidas com o modelo (Figura 9 e Figura 10). Em termos de intensidade apresentam valores junto ao cais de 30-60 cm/ano (Figura 6) que é um resultado mais próximo do cenário de massa volúmica de 1100 kg/m³ (Figura 10).

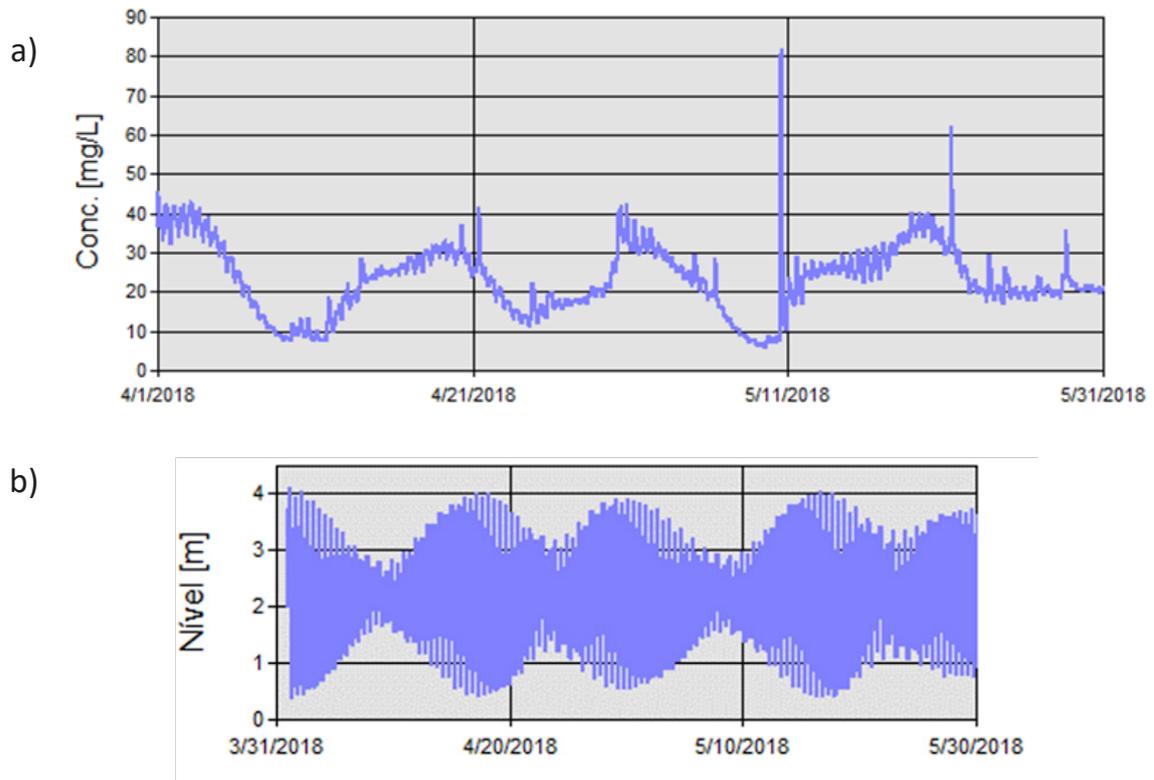


Figura 7. a) Evolução temporal da concentração de sedimentos finos simulado pelo modelo para a zona de interesse ao longo de 2 meses (ver Figura 5). b) Evolução do nível do mar para o mesmo ponto.

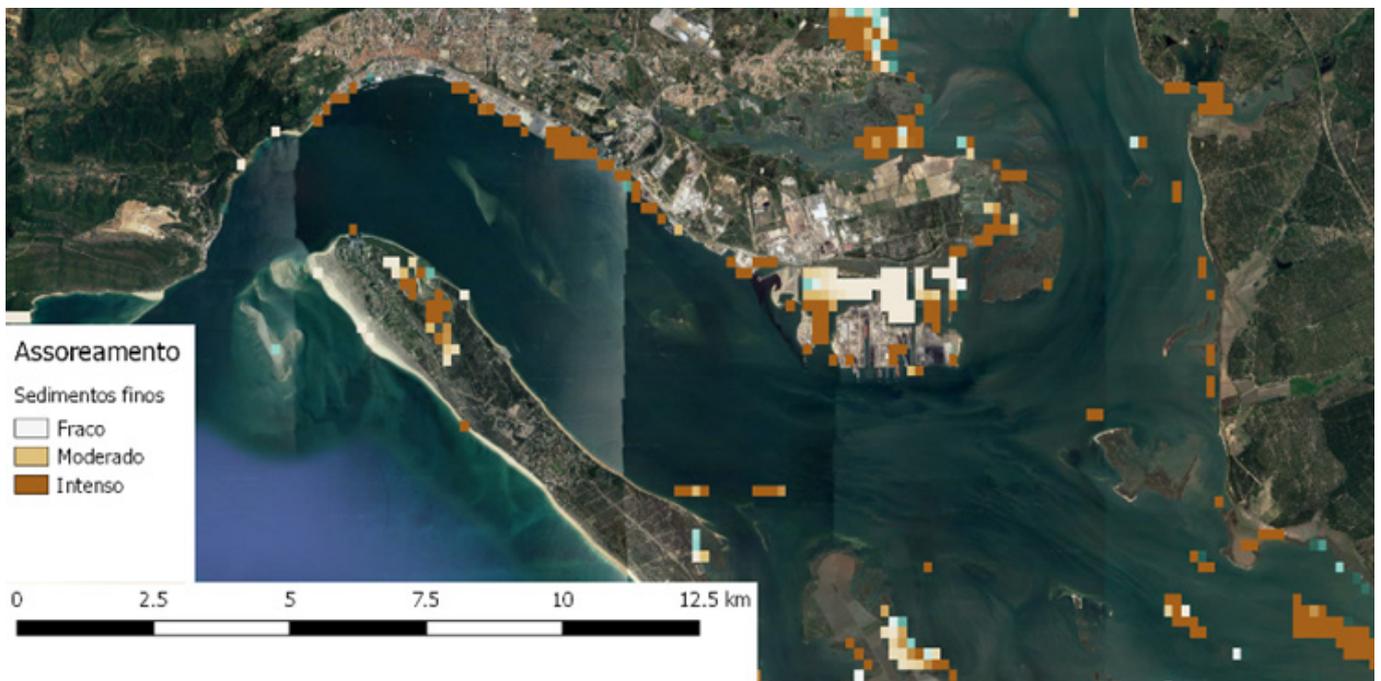


Figura 8. Áreas de assoreamento de sedimentos finos não-consolidados obtidos pelo modelo MOHID à escala do estuário.

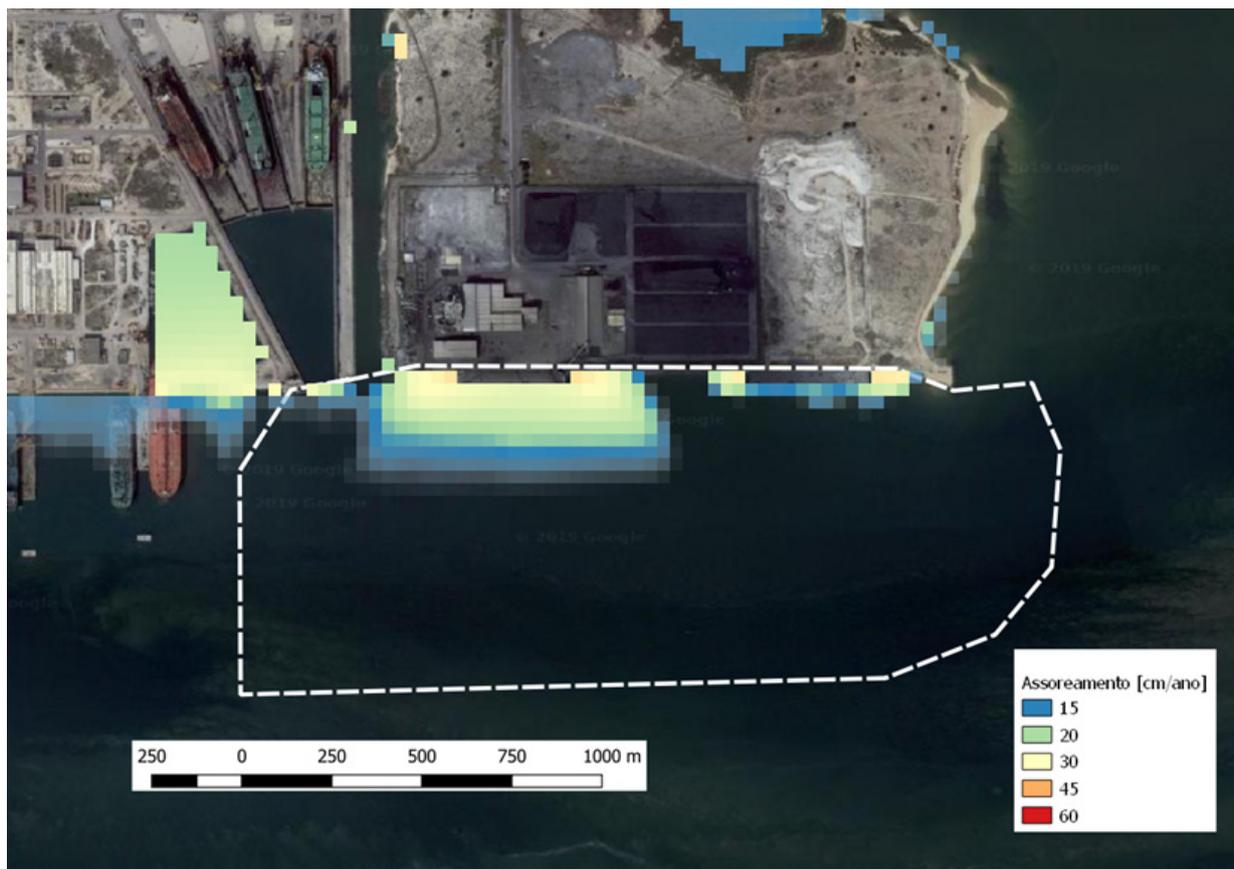


Figura 9. Taxas de assoreamento obtidas com o modelo de alta resolução assumindo uma massa volúmica de 1200 kg/m³.

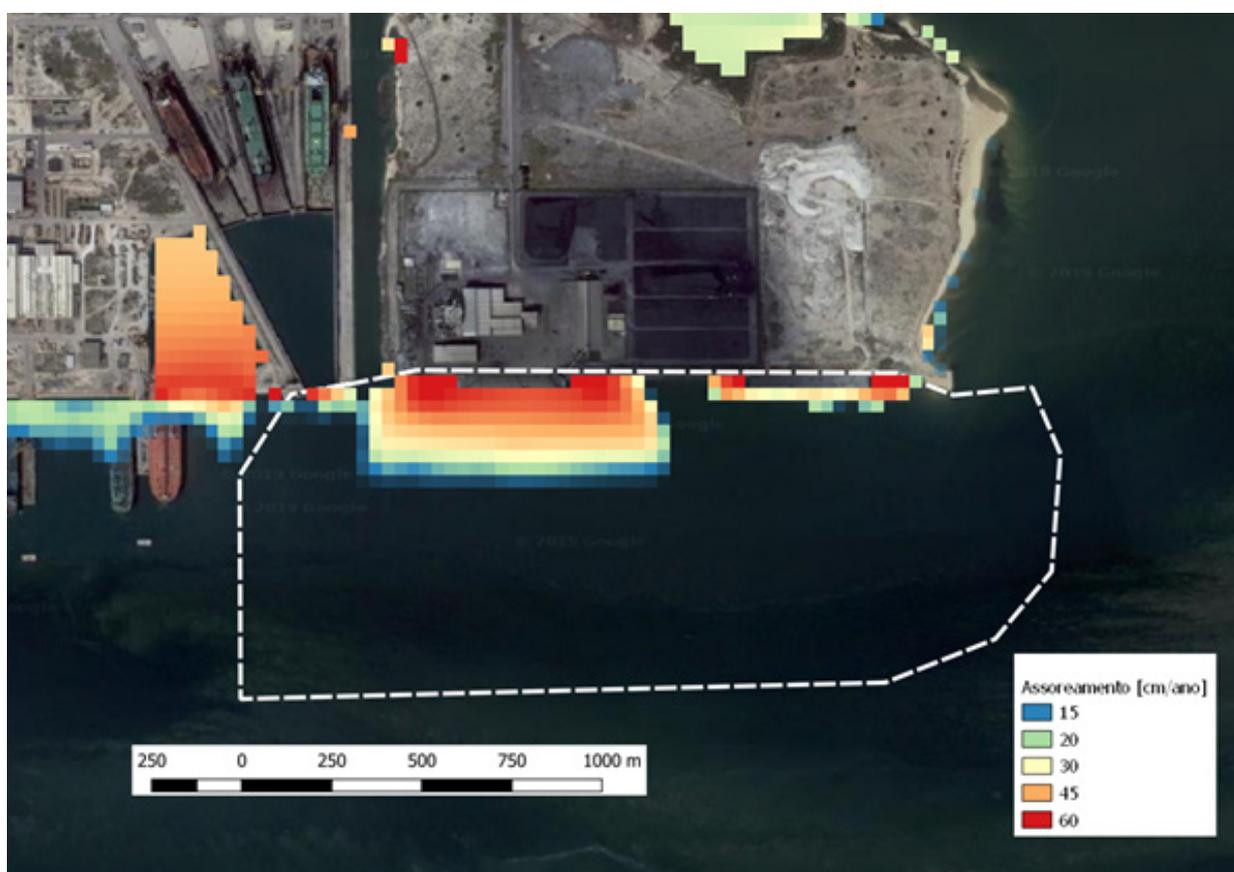


Figura 10. Taxas de assoreamento obtidas com o modelo de alta resolução assumindo uma massa volúmica de 1100 kg/m³.

5. CONCLUSÕES

O modelo MOHID reproduz qualitativamente as zonas de sedimentação mais intensa de sedimentos finos à escala do estuário. Na área adjacente ao cais da Teporset as taxas de assoreamento são semelhantes às obtidas a partir dos levantamentos batimétricos principalmente em termos de variabilidade espacial.

Em termos de valores anuais o modelo apresenta valores na zona próxima do cais da ordem de 20-30 cm/ano (assumindo sedimentos de fundos com as características medidas em 2006 – massa volúmica de 1200 kg/m³) enquanto as diferenças de levantamentos de 2017 e 2016 apresentam valores da ordem dos 30-60 cm/ano. No entanto, no período anterior a 2016 ocorreram dragagens sistemáticas. Entre 2016 e 2017 foi um período sem dragagens podendo neste período o nível de consolidação dos sedimentos ser menor e a sua massa volúmica estar mais próxima do limite inferior apresentado por Van Rijn (2015), ou seja, 1100 kg/m³. Neste caso as taxas de assoreamento obtidas com o modelo são da ordem de 30-60 cm/ano.

Apesar da concordância obtida entre as diferenças de levantamentos e as taxas de assoreamento modeladas esta deve ser encarada com alguma prudência. Por um lado, as diferenças entre levantamentos apresentam valores da ordem de grandeza da precisão aconselhada pelas normas internacionais para levantamentos deste tipo. Por outro, os resultados do modelo estão muito dependentes da massa volúmica assumida. Os levantamentos batimétricos focados na monitorização de canais de navegação não substituem campanhas de medidas focadas na caracterização da dinâmica sedimentar e o trabalho complementar em laboratório. No entanto, podem ser uma boa primeira aproximação para verificar se taxas de assoreamento de sedimentos finos obtidos com um modelo numérico são consistentes em termos de variabilidade espacial e ordem de grandeza, em especial em zonas com forte assoreamento.

REFERÊNCIAS

- Andrade, C.; Freitas, M.C.; Brito, P.; Amirm, A.; Barata, A. E Cabaço, G (2006). Estudo de Caso da Região do Sado. Zonas Costeiras, In Santos, F.D. e Miranda, P. (eds), alterações Climáticas em Portugal – Cenários, impactos e medidas de adaptação. Projecto SIAM II, Gradiva, Lisboa, Portugal, pp. 389-479.
- Brito, D. (2005) - Integração de detecção remota, dados in-situ e modelos numéricos no estudo do transporte de sedimentos coesivos no estuário do Tejo. Final Course Dissertation. Technical University of Lisbon, Portugal. Unpublished.
- Cancino, L.; Neves, R. (1995). Three-dimensional model system for baroclinic estuarine dynamics and suspended sediment transport in a mesotidal estuary. In: Computer Modelling of Seas and Coastal Regions II, C.A. Brebbia, L. Traversoni & L.C. Wobel (eds.), WIT Press. pp 353-360. DOI: 10.2495/CE950401
- Franz G.; Pinto L.; Ascione I.; Mateus M.; Fernandes R.; Leitão P.; Neves R. (2014) - Modelling of cohesive sediment dynamics in tidal estuarine systems: Case study of Tagus estuary, Portugal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 151: 34-44. DOI: 10.1016/j.ecss.2014.09.017
- Gaudêncio, M. J.; Guerra, M. T. & Pereira, A. (2006) - Sedimentos Superficiais do Estuário do Sado (APSS). Classificação granulométrica dos teores de matéria orgânica total e de água. IPIMAR Novembro, 2006. Unpublished.
- IHO (2019). Standards for Hydrographic Surveys (S-44) 6th Edition draft 1.7.0 July 2019. Retrieved from https://iho.int/uploads/user/pubs/Drafts/S-44_Edition_6_draft_1_7_1.pdf
- Martins F, Leitão P, Silva A, Neves R. 3D modelling in the Sado estuary using a new generic vertical discretization approach. *Oceanologica Acta*. 2001; 24(Supplement 1): 51-62. DOI: 10.1016/S0399-1784(01)00092-5.
- Martins F.; Leitão P.; Neves R. (2002) - Simulating vertical water mixing in homogeneous estuaries: the SADO Estuary case. *Hydrobiologia*, 475/476: 221-227. DOI: 10.1023/A:1020369431924
- Neves, R. J. (1984) - A bidimensional model for residual circulation in coastal zones. Application to the Sado Estuary. *Annalles Geophysicae*, 3 & 4: 465-472.
- Rodrigues, A. M. J. (1992) - Environmental status of a multiple use estuary, through the analysis of benthic communities: the Sado estuary, Portugal. [PhD Thesis]. University of Stirling, Stirling. <https://dspace.stir.ac.uk/handle/1893/2597#.XZJC0kb0mUk>
- Silveira, L. Gomes G., Taiani L., Pinheiro V., Benedet L., Marques A. e Loureiro C. 2017. Integrated method for optimal channel dredging design. *Terra et Aqua*, No. 146, March 2017. Retrieved from <https://www.iadc-dredging.com/wp-content/uploads/2017/03/article-integrated-method-for-optimal-channel-dredging-design-146-1.pdf>
- Van Rijn, L. C. (2013) - Basics of channel deposition/siltation. Retrieved from <https://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Channelsedimentation2013.pdf>
- Van Rijn, L. C. (2015) - Land reclamations of dredged mud. Retrieved from <https://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Landreclamationmud2015.pdf>