



Análise hidrodinâmica do estuário do rio Lima, Portugal, a partir de simulação numérica

doi:10.4136/ambi-agua.1925

Received: 03 May 2016; Accepted: 06 Mar. 2017

Nelson Carvalho Dantas de Brito Costa¹; Stênio de Sousa Venâncio^{2*};
José Luís da Silva Pinho¹; José Manuel Pereira Vieira¹

¹Universidade do Minho (UM), Braga, Portugal

Departamento de Engenharia Civil, Centro do Território, Ambiente e Construção (CTAC)

²Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Uberaba, MG, Brasil

Departamento de Engenharia Civil

*Autor correspondente: e-mail: stenio@civil.uftm.edu.br,

a61843@alumni.uminho.pt, jpinho@civil.uminho.pt, jvieira@civil.uminho.pt

RESUMO

A complexidade que envolve a gestão sustentável das zonas costeiras, associada a sua relevância econômica e sócioambiental, tem como pré-requisito o conhecimento do padrão hidrodinâmico dos estuários, que é influenciado diretamente pelas vazões típicas e pelas marés oceânicas, como também pode sofrer impacto devido às alterações morfológicas do leito e condições de estratificação. Neste trabalho, com base no programa Delft3D, desenvolvido pela Deltares, um modelo bidimensional foi criado para a análise de padrões hidrodinâmicos do estuário do rio Lima, Portugal, a partir de simulação dos níveis da superfície livre e velocidades, considerando vazões fluviais extremas e maré alta de águas vivas. Dados de campanha hidrométrica, com monitorização da dinâmica da superfície livre do estuário, foram obtidos em quatro estações específicas e serviram para a calibração do modelo apresentando uma boa correlação entre os valores de níveis medidos e simulados, com ligeiro desvio no período de maré baixa. Pelo modelo de eficiência de Nash-Sutcliffe (*NSE*), por exemplo, com excessão da estação de Lanheses2 (com *NSE* = 0,87), as outras três estações monitoradas apresentaram *NSE* acima de 0,94. O modelo apresentou robustez e se mostrou capaz em representar o fenômeno real, e permite identificar o comportamento hidrodinâmico do estuário em cenários distintos de vazão e maré. As zonas suscetíveis a inundações, assim como a influência que a vazão e a maré oceânica exercem sobre o padrão hidrodinâmico, foram analisadas numericamente. Os resultados apontaram uma maior influência da vazão fluvial sobre os níveis de água no estuário, sendo que a maré exerce maior influência para o interior do estuário, principalmente em cenários de baixas vazões fluviais. O modelo pode ser considerado como uma ferramenta básica para o estudo e processo de gestão do estuário do rio Lima, cuja abrangência depende da extensão das campanhas de monitorização e calibração dos parâmetros envolvidos, que são objetivos da continuidade deste trabalho.

Palavras-chave: Delft3D, modelagem, vazão.

Hydrodynamic analysis of Lima River estuary, Portugal, based on numerical simulations

ABSTRACT

The complexity involved in the sustainable management of coastal zones, with their economic and socio-environmental importance, requires a sound knowledge of their hydrodynamics, which are directly influenced by river discharges and ocean tides, but can also be influenced by morphological changes of beds and stratification conditions. This work implemented a two-dimensional hydrodynamic model, using Delft3D software developed by Deltares for analysis of hydrodynamic patterns in the Lima River estuary, Portugal. Water levels and velocities were simulated, considering extreme river discharges and high tides of tidal waves. The model was calibrated using hydrometric field data from the measurement of water levels at four specific locations, showing a good correlation between the measured and simulated water levels, with slight deviation in the low tide period. For Nash-Sutcliffe efficiency metrics (NSE), for example, with the exception of Lanheses2 station (with NSE = 0.87), the other three monitored stations showed NSE above 0.94. The model was strong and was capable of representing real phenomenon and allowing the characterization of hydrodynamic behavior in different scenarios of river discharges and tides. The areas susceptible to flooding as well as the influence the flow and ocean tides have on the hydrodynamics were numerically analyzed. The results showed a greater influence of river flow on the water levels within the estuary, with the tide exerting greater influence in the interior of the estuary, especially in low river flow scenarios. The model can be considered an important tool for the study and management of Lima River estuary, and its capabilities will be extended to morphodynamic and stratification simulations using field data that is being collected.

Keywords: Delft3D, modeling, water flow.

1. INTRODUÇÃO

Cerca de 60% das grandes cidades existentes no nosso planeta estão localizadas em zonas próximas a estuários, sendo estas regiões consideradas como as mais valiosas e mais apetecíveis para a população em geral (Duarte e Vieira, 1997). O elevado crescimento da ocupação humana das regiões litorais origina impactos negativos, como por exemplo as inundações. Perceber estes impactos e identificar as suas causas é uma tarefa importante e necessária para o processo de gestão sustentável, possibilitando medidas estratégicas que visem diminuir ou anular as consequências para todos os seres vivos (Bell et al., 2000). Por ora, a complexidade destes ambientes costeiros dificulta as tarefas de previsão do seu comportamento, o que se deve à interação da vazão do rio, correntes de maré e a morfologia do canal, produzindo tipos de circulação e estratificação não triviais do ponto de vista de análise, e que afetam, por sua vez, diretamente a composição e distribuição da fauna e flora. Contudo, o entendimento dos processos hidrodinâmicos e de transporte em estuários é de grande importância para o projeto de estruturas costeiras, modelagem ambiental e minimização dos efeitos de descargas poluentes.

Com o grande desenvolvimento tecnológico verificado, o domínio da hidroinformática permite simular o funcionamento destes sistemas complexos, representando um ganho monetário e de tempo consideráveis para diagnósticos e projetos, além da possibilidade de realizar prognósticos de longo prazo. Os vários modelos desenvolvidos e validados em aplicações nos sistemas hidráulicos reais de pequena e grande escala demonstram a capacidade para simular, com confiança, os processos de correntes, ondas, salinidade e de transporte de sedimentos em zonas estuarinas, como por exemplo, HAMSOM (Backhaus, 1983), POM

(Blumberg e Mellor, 1987) e sua versão comercial ECOM-si (Blumberg, 1994), e FVCOM (Chen et al., 2003) para correntes; ECOMSED (Blumberg, 2002) para o transporte de sedimentos; SWAN (Booij et al., 1996) para agitação; o modelo ROMS (Shchepetkin e McWilliams, 2005), MIKE 3, por DHI Water and Environment, e Delft3D, por Deltares (Delft3D-Flow, 2011), instituto de pesquisa da Holanda, para simulações abrangentes. Apesar do avanço tecnológico verificado, estudos desta natureza sobrepõe as dificuldades de obtenção de dados de campo para a calibração dos modelos, sejam em escassez, escala ou até mesmo em confiança, e também as limitações matemáticas dos modelos para integrarem certos parâmetros naturais de maneira realista. Entretanto, do ponto de vista prático, as intervenções ambientais de engenharia e seus decorrentes impactos poderão ser realizados recorrendo-se à modelação matemática. Em estuários, as aplicações mais comuns advêm da previsão de inundações, análise da intrusão salina, o cálculo de tempos de residência, a propagação e rebentação das ondas e a previsão de sobrelevações e de correntes litorais devidas à agitação.

Este trabalho tem por objetivo principal caracterizar a hidrodinâmica no estuário do rio Lima, entre a sua foz em Viana do Castelo e o açude da vila de Ponte de Lima, no norte de Portugal (Figura 1), a partir de calibração hidrodinâmica de curto período dos níveis de maré, obtidos por campanhas de campo. O procedimento de calibração de níveis de água em período de tempo não extensivo tem sido apontado por diferentes trabalhos para resultados de análise hidrodinâmica realistas, como por exemplo em Hu et al. (2009), com 30 horas de calibração, Wan et al. (2014), 48 horas, e Uncles et al. (2013) com período de 48 horas, o que representa um ganho expressivo de tempo de estudo. Como objetivo específico, o conhecimento das áreas alagáveis e das zonas de baixa e elevada velocidade da água vem representar uma importância fundamental para o gerenciamento do sistema, permitindo definir políticas que sejam sustentáveis para a região do estuário. Para esta análise, valores de vazões representativos do estuário e séries temporais de maré são utilizados. O programa Delft3D utilizado neste trabalho tem sido amplamente empregado em todo o mundo (por exemplo: Harcourt-Baldwin e Diedericks, 2006; Van Maren, 2007; Bouma et al., 2007; Tonon et al., 2007; Allard et al., 2008), e pode realizar simulações de fluxos, transportes de sedimentos, ondas, qualidade da água, estudos morfológicos e processos ecológicos em áreas costeiras, fluviais e estuarinas. É constituído por vários módulos que podem interagir uns com os outros. Delft3D-FLOW, a base de um destes módulos, é um sistema multi-dimensional (2D ou 3D) hidrodinâmico (e de transporte) que resolve as equações de Navier-Stokes para um fluido incompressível sob o conceito de águas rasas e os pressupostos de Boussinesq, e calcula o transporte de sedimentos e atualizações morfológicas simultaneamente com o fluxo (ver Lesser et al., 2004, para descrição detalhada e validação). Os efeitos da agitação sobre o transporte de sedimentos também podem ser considerados por acoplamento ao módulo Delft3D-WAVE (modelo de ondas SWAN). Neste estudo, um modelo bidimensional para simulação hidrodinâmica foi desenvolvido para o estuário do rio Lima com base no Delft3D-FLOW. Após as definições de parâmetros específicos e calibração para os dados de campo obtidos, uma análise hidrodinâmica da zona estuarina foi realizada a partir da simulação dos níveis de água e velocidades para cenários de mínima e máxima vazão e maré alta de marés vivas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

Na Figura 1 é apresentada a localização da área estudada, destacando as fronteiras consideradas (montante: açude da vila de Ponte de Lima; jusante: oceano Atlântico), assim como as estações de monitorização hidrométrica utilizadas para calibrar e validar o modelo

numérico (Lanheses1, Vila Mou, Lanheses2 e Cardielos). A caracterização da área segue a descrição de Pinho et al. (2014) e Vieira e Pinho (2010).

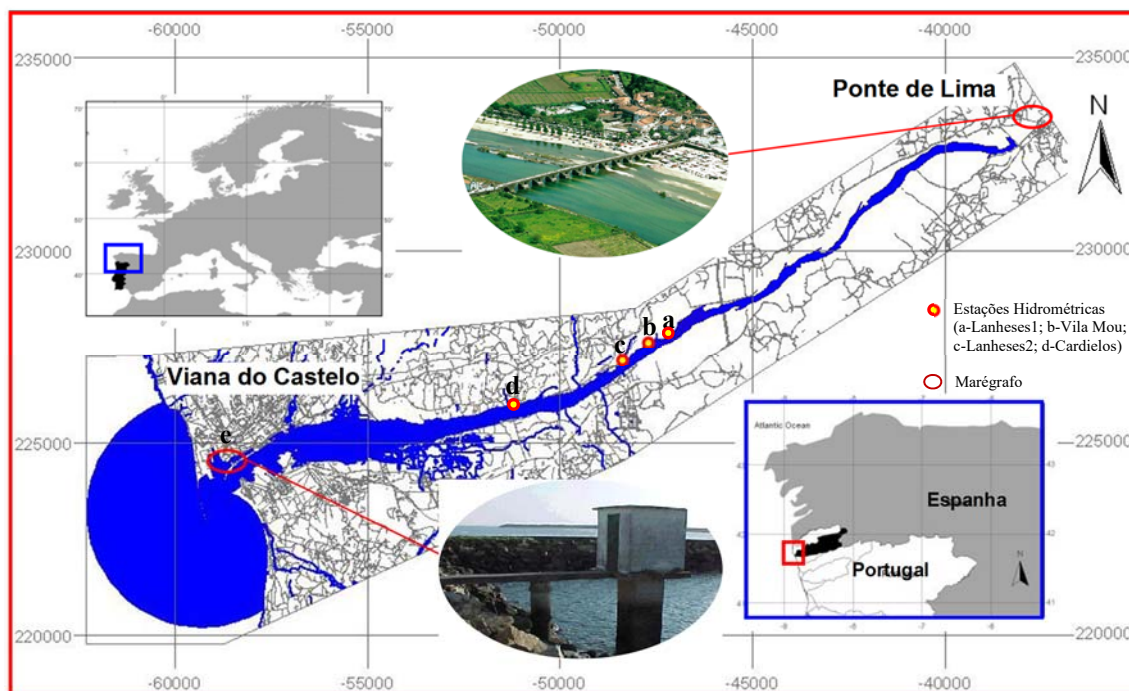


Figura 1. Localização do estuário do rio Lima, fronteiras consideradas e estações hidrométricas.

Fonte: modificado de Vieira e Pinho (2010).

O rio Lima nasce no monte Talariño, a uma altitude de 975 metros, na Serra de São Mamede, na província de Ourense em Espanha. Entra em Portugal nas proximidades de Lindoso e deságua em Viana do Castelo, apresentando uma extensão total de cerca de 108 km, dos quais 67 km em território português, e destes aproximadamente 20 km abordados neste estudo.

A bacia do rio Lima apresenta uma forma alongada e é limitada a norte pela bacia hidrográfica do rio Minho, a leste pela do rio Douro e a sul pelas bacias dos rios Cávado e Âncora. Tem uma superfície de aproximadamente 2450 km². A altitude média da bacia é de 447 m, sendo a Serra da Peneda e a Serra Amarela os setores mais elevados, respectivamente com 1416 m e 1361 m. O clima da região deste rio resulta da sua posição geográfica e proximidade do Atlântico e é caracterizado como sendo do tipo marítimo.

As disponibilidades hídricas desta bacia estão essencialmente dependentes da forma como a precipitação se distribui espacial e temporalmente, uma vez que os aquíferos têm uma baixa capacidade de armazenamento, o que faz com que o escoamento tenha uma resposta relativamente rápida à ocorrência de precipitação. A região desta bacia é de elevada pluviosidade, ocorrendo precipitação média anual entre 1300 e 4200 mm.

O escoamento anual médio, quando entra em Portugal, é de 1598 hm³ e na foz, de 3304 hm³. De uma forma sintetizada, esta bacia apresenta um clima bastante úmido e caracteriza-se por uma pequena deficiência de água no Verão e um excesso no Inverno. A satisfação de pedidos de irrigação, de abastecimento público e para produção de energia é conseguida a partir de volumes armazenados durante períodos úmidos. São dois os grandes aproveitamentos hidroelétricos em funcionamento ao longo da bacia: Alto Lindoso e Touvedo. A barragem do Alto Lindoso situa-se junto da fronteira com a Espanha, sendo o maior produtor hidroelétrico de Portugal. Funciona como reguladora da vazão do rio Lima em conjunto com a barragem de Touvedo, estando ambas as barragens à montante do trecho do estuário estudado.

No estuário, o rio fica mais largo e com uma inclinação muito reduzida, propiciando a formação de depósitos sedimentares tanto no leito como nas suas margens. Assim, formam-se ínsuas e margens muito extensas, que rapidamente são dominadas por vegetação herbácea, criando uma série de praias fluviais até à zona de Viana do Castelo. Devido a estas características, as zonas de leito de cheia do rio são zonas com uma cota muito próxima das margens e com uma grande extensão que, na ocorrência de grandes vazões, são facilmente inundadas, chegando a aumentar em duas vezes a largura do rio. No que diz respeito à zona da foz em Viana do Castelo, esta varia de 800 m, perto da ponte Eiffel, até 300 m, entre o porto antigo e o novo. Existe esta variação de larguras devido à presença do porto marítimo de maiores dimensões para conseguir dar resposta a maiores embarcações. Assim, o porto passou da margem norte para a margem sul, estreitando ainda mais o rio. Consequentemente, e com a necessidade de garantir a entrada e saída das embarcações, existem duas obras marítimas de grandes dimensões que protegem a entrada da foz das fortes ondulações provenientes do mar. Neste percurso o canal do rio é estreito e possui uma profundidade média de 10 m, havendo uma sistemática remoção de inertes por parte do porto de Viana do Castelo para manter as condições de navegabilidade do canal. De acordo com o estudo feito pela empresa de projetos de engenharia PROMAN (2006), na zona do estuário não existem afluentes com dimensão nem vazão suficientes para provocar alterações significativas no canal principal do rio. Em relação às vazões existentes no Rio Lima, estas são diretamente condicionadas e geradas pelas duas barragens referidas. Segundo análises estatísticas dos dados existentes na plataforma do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), da estação hidrométrica que existe logo a seguir à barragem de Touvedo, conclui-se que a vazão média anual ronda os 38 m³/s. Porém, em época de verão, este valor pode baixar para cerca de 5 m³/s.

2.2. Dados de campo

O trabalho de campo foi realizado entre o dia 06-07-2015 e o dia 11-07-2015 e consistiu da colocação de sonda do tipo RBR- TGR2050 nos locais já identificados anteriormente na Figura 1. A escolha dos locais se deu em função da facilidade de acesso e atendimento aos critérios necessários para a instalação do equipamento, além do critério hidráulico (Figura 2a). De posse dos dados de previsão de maré para o período através do Instituto Hidrográfico, foi instalada a sonda no período de maré baixa o que, além de facilitar a instalação, possibilita registrar um maior conjunto temporal de níveis de água com a sonda submersa. A sonda foi fixada, através das estruturas existentes, ex. estrutura de ancoragem de barcos (Figura 2b), ou usando a estrutura metálica própria (Figura 2c). Após o processo de instalação, a mesma foi coberta com vegetação de forma a garantir a sua segurança, prevenindo contra possíveis danos ou furto (Figura 2d). O equipamento ficou submerso durante dois períodos de maré (24 horas) para as estações de Lanheses 1, Lanheses 2 e Vila Mou. Na estação de Cardielos só foi conseguido um período de maré (12 horas) devido às questões operacional e de segurança, pois esta foi instalada em um local com característica balnear (de fácil acesso). Os dados registrados pela sonda, em cada ciclo da campanha, foram exportados para o programa Excel através do software Ruskin do próprio equipamento, sendo a sonda reconfigurada para o próximo ciclo. Adicionalmente à campanha de registro de níveis de água no estuário, foi obtido também o registro instantâneo de maré oceânica pelo marégrafo de Viana do Castelo, assim como as vazões diárias típicas, máxima e mínima do estuário através dos dados fornecidos pela companhia Energias de Portugal – EDP. Os dados de vazão foram gerados a partir do complexo hidrelétrico de Touvedo. Os dados de batimetria do estuário são relativos ao final do ano de 2003 e início de 2004, e foram obtidos pela APA – Agência Portuguesa do Ambiente, sendo que na área específica da foz (na embocadura), refere-se ao levantamento feito pela Administração do Porto de Viana do Castelo, para o mesmo período.

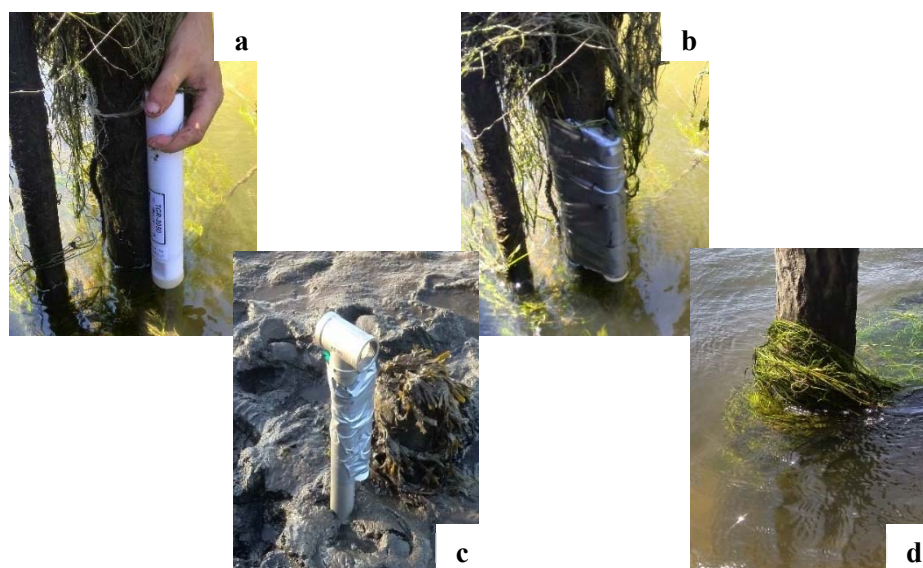


Figura 2. Processo de instalação da sonda para o registro dos níveis de água (Cardielos).

2.3. Simulação numérica

A escolha do módulo 2D do código Delft3D adequa-se aos objetivos do trabalho onde a determinação do leito de cheia é pretendido. Testes realizados por este trabalho envolvendo também o módulo 3D conduziram para resultados semelhantes aos obtidos no módulo 2D, mas com tempo de processamento maior. O modelo numérico hidrodinâmico bidimensional construído com o uso do módulo FLOW do Delft3D (Delft3D-FLOW, 2011) resolve numericamente as equações de conservação de massa e quantidade de movimento obtidas a partir das equações de Navier-Stockes, recorrendo a um método numérico baseado no método das diferenças finitas. Assume-se o conceito de águas rasas para a determinação dos níveis de água e velocidades. Sua implementação consistiu, inicialmente, da elaboração de uma malha computacional, com um total de 15558 células de cálculo ortogonais, e respectiva batimetria (Figura 3), com dimensões variando entre 10 m e 500 m, necessárias e suficientes para abranger toda a área do estuário (leitos maior e menor). Os dados batimétricos do estuário foram disponibilizados pela Administração do Porto de Viana do Castelo. De maneira a evitar instabilidades numéricas, o passo de tempo definido foi de 1 minuto, sendo que valores superiores conduziram para a instabilidade do processamento. Os parâmetros de resistência e de turbulência adotados decorreram dos processos de calibração dos níveis de água (dados de campo) e testes de sensibilidade, assumindo o coeficiente de rugosidade de Manning o valor de $0,015 \text{ s.m}^{-1/3}$ e o coeficiente de viscosidade e difusividade turbulenta horizontal de $1 \text{ m}^2/\text{s}$. Nas fronteiras abertas do modelo numérico foram considerados a vazão média diária (à montante) e os dados de maré instantânea (à jusante), relativos ao período da campanha. Os pontos de monitoramento de nível de água no estuário foram, conforme campanha, introduzidos na malha numérica para a calibração do modelo (cenário C1). O período simulado pelo modelo, para o cenário C1, é de 7 dias, sendo o mesmo calibrado para os dados de níveis de maré de 24 horas, registrados pela sonda. Para a análise numérica dos níveis hidrodinâmicos, várias configurações de vazão e maré foram avaliadas após a calibração do modelo. Dois cenários representativos foram propostos: a situação das cheias no estuário e também o perfil de vazão fluvial baixa. A vazão mínima considerada, $38 \text{ m}^3/\text{s}$ (cenário C2), que é registrada ou é superada durante 50% do tempo, propicia uma avaliação da influência da maré nos níveis de água do estuário; já a vazão máxima de $3200 \text{ m}^3/\text{s}$ (cenário C3), corresponde a vazão milenar e permite identificar o efeito da vazão sobre os níveis de água atingidos no estuário. Ambos os cenários consideram

maré alta em situação de marés vivas. O período de simulação é de 2 dias para C2 e C3, tempo suficiente para o estabelecimento das condições de máximos níveis no estuário. Apesar do modelo permitir a inserção da variável vento no processo de cálculo hidrodinâmico, o mesmo não foi considerado. Isto porque a dimensão máxima do escoamento em relação às características do vento faz com que estas últimas assumam correntes de ordem inferior, como verificado em testes preliminares e conforme também concluído por Vieira e Pinho (2010), não interferindo nos resultados gerados pelo modelo.

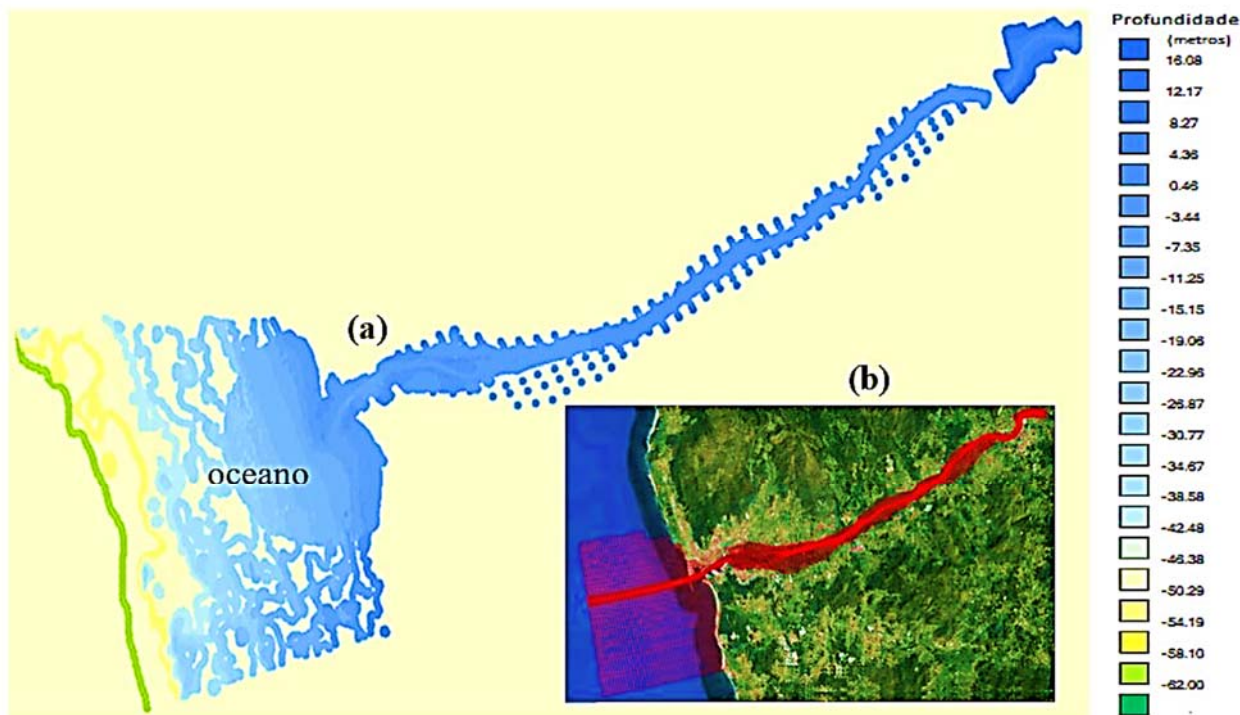


Figura 3. Batimetria (a) e malha computacional (b) utilizadas no modelo numérico.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o cenário de calibração (C1), os resultados do modelo apresentaram uma boa concordância, segundo análise gráfica e quatro métricas utilizadas: o modelo de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), a soma das diferenças entre valores simulados e valores observados ($BIAS$), raiz quadrada do erro quadrático médio ($RMSE$) e a média do erro absoluto (MAE). A Figura 4 mostra o gráfico de calibração com os valores obtidos pelas métricas.

A resposta apresentada pelo modelo demonstra robustez, com capacidade de representar o fenômeno real. Pelo modelo de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), por exemplo, com exceção da estação de Lanheses2 (com $NSE = 0,87$), todas as outras estações apresentaram NSE acima de 0,94. Ligeiras diferenças entre níveis medidos e simulados apenas foram verificadas nas estações de Lanheses1 e Lanheses2 no período de maré baixa, e podem estar associadas à leitura feita pela sonda nestas condições ou devido ao próprio modelo de elevação utilizado como base da simulação hidrodinâmica, que causa impacto direto, sobretudo em cenários de maré baixa, conforme destacado por Falcão et al. (2013). Entretanto, dada à aproximação conseguida, é de considerar que este fato não compromete a análise da característica hidrodinâmica do estuário. Como é de se observar também, os registros de níveis mínimos efetuados pela sonda ficaram prejudicados para a situação de maré baixa. Isto ocorreu devido à cota de instalação da sonda

por limitações físicas locais (ex.: base de fixação, vegetação, assoreamento), mas que não compromete a análise qualitativa proposta para este trabalho.

O resultados das simulações referentes aos níveis de água obtidos no estuário para os cenários C2 e C3 são apresentados na Figura 5.

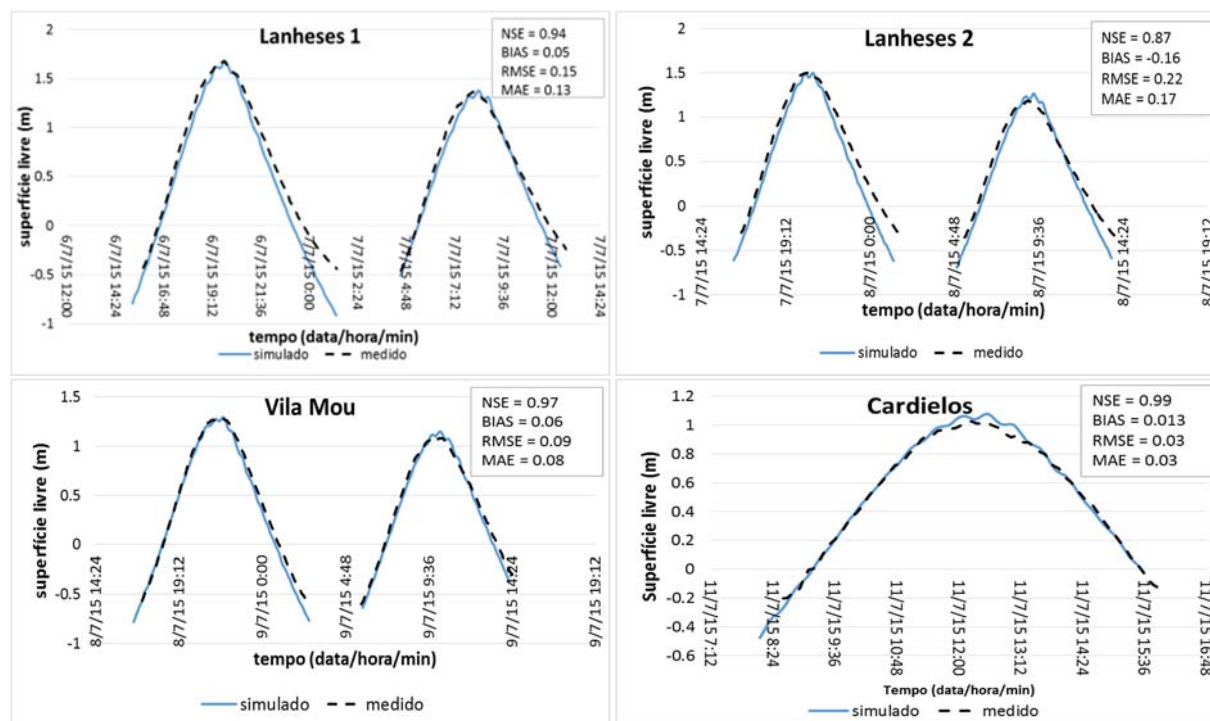


Figura 4. Calibração dos níveis de água, cenário C1, com coeficiente de rugosidade de Manning de $0.015 \text{ s.m}^{-1/3}$ e viscosidade turbulenta de $1 \text{ m}^2/\text{s}$.

Uma análise comparativa entre os dois cenários mostrados possibilita verificar uma ampliação considerável na largura do leito de escoamento de C2 para C3, o que denota uma influência considerável da vazão de Touvedo sobre o estuário, uma vez que ambos os cenários foram simulados sob a mesma condição de maré. Dada a característica topográfica do leito do estuário e das áreas adjacentes, uma elevação considerável do nível de água não é verificada, o que vem a justificar a ampliação da seção transversal do leito de escoamento. As profundidades de água registradas pelo modelo no cenário C2 variam entre os 4 m à 10 m, com exceção da foz do estuário, onde o valor de 10 m é superado. Estes níveis se aproximam dos valores reais em pontos amostrados no trecho central do estuário, para vazões próximas da considerada no cenário C2. As áreas de inundação identificadas pelo modelo numérico no cenário C3 são condizentes às marcas de inventário relativas à cheia de 15/11/1987, que registrou vazão fluvial de $3120 \text{ m}^3/\text{s}$ e nível de água de 7,25 m no açude da vila de Ponte de Lima (Pinho et. al., 2014), com impacto direto para os vários núcleos populacionais instalados nestas áreas, e que exercem atividade agrícola fixada nos leitos de cheia. Também é destacada na Figura 5, cenário C3, a isóbara de cheia correspondente ao estudo realizado pela Agência Portuguesa do Ambiente – APA, na hipótese de baixo risco de inundação (vazão milenar) para a região de Ponte de Lima, cuja área inundada é praticamente idêntica à gerada pelo modelo numérico. Este estudo é disponibilizado pelo Sistema Nacional de Informação de Ambiente (SNIAmb, 2016) e tem como referência a Directiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de outubro de 2007, relativa a avaliação e gestão dos riscos de inundações.

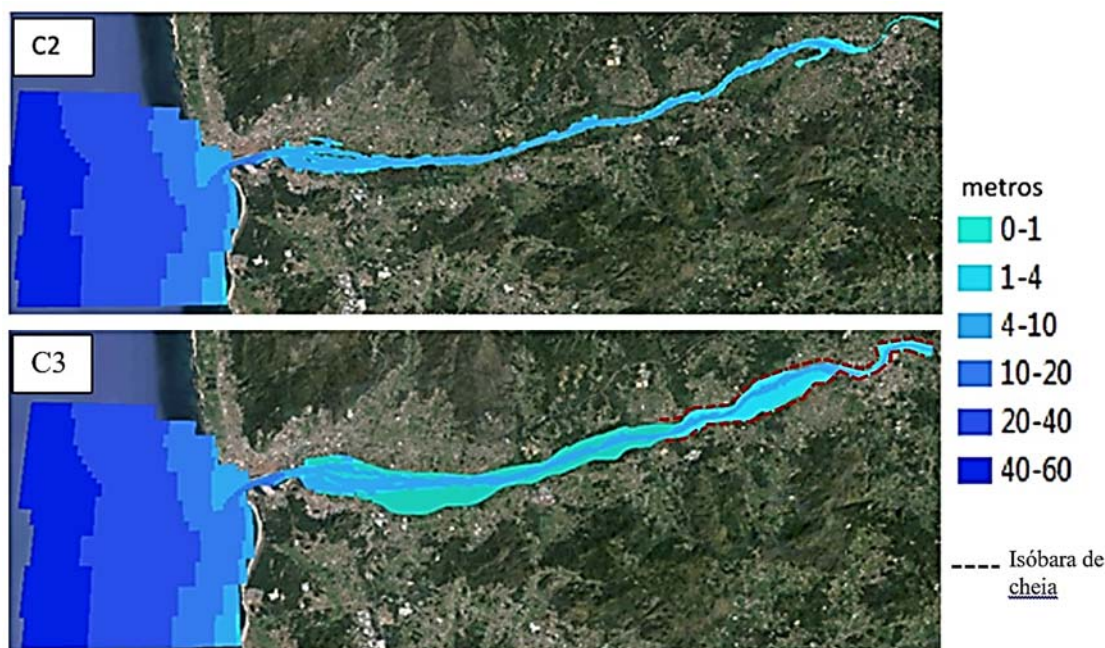


Figura 5. Nível de água no estuário, referido ao NMmar, em situação de maré viva, para os cenários C2 ($38 \text{ m}^3/\text{s}$) e C3 ($3200 \text{ m}^3/\text{s}$), com isóbara de cheia (SNIAmb, 2016).

Na Figura 6 apresentada a seguir são destacados três pontos no modelo numérico do estuário (A – embocadura, B – zona central da foz e C – início da foz), onde é feita uma análise das velocidades obtidas na simulação de forma a complementar a caracterização hidrodinâmica pretendida. Nota-se que a zona imediatamente anterior à foz (especificamente em C) possui velocidades baixas não superiores a 1.6 m/s , o que indica que nestas zonas há a forte possibilidade de ocorrer depósitos de sedimentos, mesmo em situação de valores elevados de vazão. Esta realidade é constatada *in loco* pelos depósitos de sedimentos configurados nesta zona do estuário. No ano de 2014, foram gastos meio milhão de euros em dragagens na região próxima da foz para manter o canal navegável (Barbosa, 2015).

É observado também nos gráficos da Figura 6, que para o cenário C2 existem picos de velocidade consecutivos de pequena amplitude, em conformidade com a oscilação entre maré alta e maré baixa. Entretanto, para o cenário C3, os picos são de maior amplitude e com valores de velocidade também maiores. Este fato sugere, para a vazão de cheia milenar, um predomínio do escoamento de montante para o cenário C3 durante toda a simulação. Contudo, há uma tendência mínima de inversão do escoamento para este mesmo cenário nas regiões (A) e (B), que decorrem da influência dos picos de maré. Para o cenário C2, a tendência de inversão do sentido de escoamento de jusante para montante, é também sentida na região C, cuja propagação foi verificada por quase 20 km a partir da foz. No estudo realizado por Rebordão e Trigo-Teixeira (2009) aplicando o modelo hidrodinâmico ADCIRC para o mesmo estuário, foi verificada uma propagação da maré oceânica para a montante com valor idêntico, considerando a situação de marés vivas e mortas e vazões fluviais. Este fato, considerando o histórico de baixos valores de vazão no estuário, cuja intensidade é controlada pelos reservatórios de montante, justifica a potencialidade da região da foz por exemplo para depositar sedimentos no leito. As pequenas instabilidades registradas nos gráficos de velocidade, sobretudo na zona da foz, são decorrentes da conformação geométrica das células, com característica ortogonal.

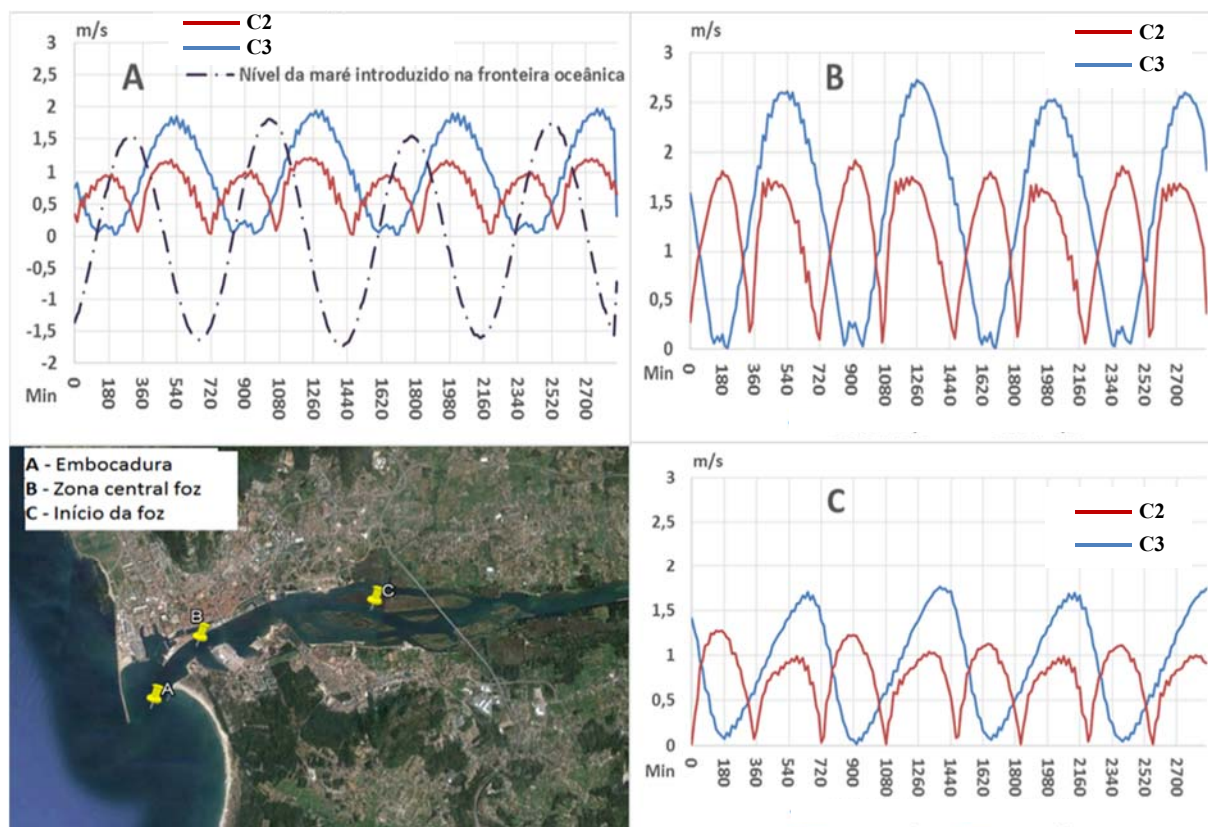


Figura 6. Velocidades simuladas em três pontos distintos da foz de Viana do Castelo, para os cenários C2 ($38 \text{ m}^3/\text{s}$) e C3 ($3200 \text{ m}^3/\text{s}$).

4. CONCLUSÕES

Atendendo a demanda prática do gestor do sistema de se conhecer a dinâmica hidráulica do estuário do rio Lima, um estudo inicial foi proposto. Campanha de monitoramento de nível em pontos do estuário foi realizada e um modelo numérico bidimensional foi implementado.

Os resultados de calibração obtidos permitiram extrapolar à análise numérica para dois cenários distintos, vazão mínima e cheia milenar. A vazão de Touvedo é determinante para a configuração dos níveis de água no estuário, tendo a maré oceânica uma influência restrita a foz de Viana do Castelo em cenário de cheia. Os valores de velocidade no estuário são relativamente baixos mesmo em situações de cheia, justificados pela presença de planícies de inundação ao longo do mesmo. Este fato condiciona a uma ampliação considerável do leito de escoamento em situações de cheia, fato este comprovado pelos inventários do estuário, o que vem a afetar a população ribeirinha para fins econômicos, de segurança e de lazer, além de potencializar o assoreamento identificado *in loco* principalmente junto da foz.

Do ponto de vista de simulação numérica, o modelo apresentou robustez e capacidade de bem representar a hidrodinâmica do estuário. Com base no conjunto de dados reunidos retrata, e com boa aproximação, a zona de inundação prevista para o entorno da vila de Ponte de Lima, segundo marcas da cheia ocorrida em novembro de 1987 e também ao estudo da Agência Portuguesa do Ambiente. Entretanto, para um avanço nas análises quantitativas, uma extensão de campanhas de campo é sugerida, de forma a possibilitar, inclusive, a análise numérica para a questão morfodinâmica, que também se apresenta como demanda dos gestores do sistema. Já com relação à campanha de níveis de água realizada, recomenda-se uma recalibração da sonda para as estações hidrométricas de Lanheses1 e Lanheses2, para a situação de maré baixa, onde foi detectada ligeira divergência entre os valores medidos e simulados. Uma estratégia de

instalação das sondas em cotas mais profundas do estuário também deverá ser analisada, com o intuito de contemplar os níveis de água correspondentes a maré baixa.

Finalmente, este estudo permitiu esboçar o padrão do comportamento hidrodinâmico do estuário do rio Lima para situações de maré e vazão fluvial extremas. Este fato, por sua vez, viabiliza tomadas de decisão realistas, como por exemplo, no subsídio da implementação de sistemas de alerta de inundação e ações da Defesa Civil na gestão do armazenamento de água e descargas de Touvedo, na definição da extensão das zonas de dragagem e também dos pontos de monitoramento hidráulico e sedimentométrico para campanhas periódicas pretendidas na continuidade deste trabalho. Por ora, um importante passo foi dado, possibilitando um maior conhecimento sobre a hidrodinâmica do estuário e, por conseguinte, permitindo o estabelecimento de políticas de gestão que resultem em ações e medidas não tomadas sem o necessário conhecimento como tradicionalmente acontece em grande parte destes sistemas hidráulicos complexos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa (Processo 200016/2014-8) de pós-doutoramento concedida ao autor 2.

6. REFERÊNCIAS

- ALLARD, R.; DYKES, J.; HSU, Y. L.; KAIHATU, J.; CONLEY, D. A real-time nearshore wave and current prediction system. **Journal Marine System**, v. 69, p. 37–58, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.02.020>
- BACKHAUS, J.O. A semi-implicit scheme for the shallow water equations for application to shelf sea modeling. **Continental Shelf Research**, v. 2, p. 243–254, 1983. [http://dx.doi.org/10.1016/0278-4343\(82\)90020-6](http://dx.doi.org/10.1016/0278-4343(82)90020-6)
- BARBOSA, B. Um milhão para dragagens. **Aurora do Lima**, n. 4, 2015.
- BELL, R.; GREEN, M.; HUME, T.; GORMAN, R. What regulates sedimentation in estuaries? **Water and Atmosphere**, v. 8, p. 13–16, 2000.
- BOOIJ, N.; HOLTHUIJSEN, L. H.; RIS, R. C. The SWAN wave model for shallow water. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 25., 1996, Orlando. **Proceedings...** New York: ASCE, 1996. vol. 1. p. 668–676.
- BOUMA, T. J.; VAN DUREN, L. A.; TEMMERMAN, S.; CLAVERIE, T.; BLANCO-GARCIA, A.; YSEBAERT, T. et al. Spatial flow and sedimentation patterns within patches of epibenthic structures: combining field, flume and modelling experiments. **Continental Shelf Research**, v. 27, p. 1020–1045, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2005.12.019>
- BLUMBERG, A. F.; MELLOR, G. L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: HEAPS, N. S. (Ed.). **Three-Dimensional coastal ocean models**. Washington, DC: American Geophysical Union, 1987. p. 1–16. <http://dx.doi.org/10.1029/CO004p0001>
- BLUMBERG A.F. A primer for ECOM-si. **Technical report of HydroQual**, 66 p., 1994.
- BLUMBERG, A.F. A primer for Ecomsed. **Technical report of HydroQual**, 188 p., 2002.

- CHEN, C.; LIU, H.; BEARDSLEY, R. C. An unstructured, finite volume, threedimensional, primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 20, p. 159–186, 2003.
- DELFT3D-FLOW. **User Manual**: simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. Deltares, 2011. 674 p.
- DUARTE, A.; VIEIRA, J. **Caracterização dos ambientes estuarinos**: mistura em estuários. Braga: Universidade do Minho, 1997.
- FALCÃO, A. P.; MAZZOLARI, A.; GONÇALVES, A. B.; ARAÚJO, M. A. V. C.; TRIGO-TEIXEIRA, A. Influence of elevation modelling on hydrodynamic simulations of a tidally-dominated estuary. **Journal of Hydrology**, v. 497, p. 152–164, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.045>
- HARCOURT-BALDWIN, J. L.; DIEDERICKS, G. P.; J. Numerical modelling and analysis of temperature controlled density currents in Tomales Bay, California. **Estuarine Coastal Shelf Science**, v. 66, p. 417–428, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2005.10.001>
- HU, K.; DING, P.; WANG, Z.; YANG, S. A 2D/3D hydrodynamic and sediment transport model for the Yangtze Estuary, China. **Journal of Marine Systems**, v. 77, p. 114–136, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.11.014>
- LESSER, G. R.; ROELVINK, J. A.; VAN KESTER, J. A. T. M.; STELLING, G. S. Development and validation of a three-dimensional morphological model. **Coastal Engineering**, v. 51, p. 883–915, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>
- PINHO, J. L. S.; FERREIRA, R.; VIEIRA, L.; SCHWANENBERG, D. Comparison between two hydrodynamic models for flooding simulations at river Lima basin. **Water Resource Management**, v. 29, n. 2, p. 431–444, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0878-6>
- PROMAN - CENTRO DE ESTUDOS E PROJECTOS SA. **Projeto das obras de 1º fase de expansão portuária do porto de Viana do Castelo**. Lisboa, 2006.
- REBORDÃO, I.; TRIGO-TEIXEIRA, A. Tidal propagation in the Lima estuary. **Journal of Coastal Research**, SI-56, p. 1400–1404, 2009. <http://www.jstor.org/stable/25738019>
- SHCHEPETKIN, A. F.; McWILLIAMS, J. C. The Regional Ocean Modeling System: a split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model. **Ocean Modelling Journal**, v. 9, p. 347–404, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.08.002>
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO DE AMBIENTE - SNIAMB (Portugal). **Website**. Disponível em: <http://sniamb.apambiente.pt/Home/Default.htm>. Acesso em: 10 nov. 2016.
- TONNON, P. K.; VAN RIJN, L. C.; WALSTRA, D. J. R. The morphodynamic modelling of tidal sandwaves on the shoreface. **Coastal Engineering Journal**, v. 54, p. 279–296, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.08.005>
- UNCLES, R. J.; STEPHENS, J. A.; HARRIS, C. Towards predicting the influence of freshwater abstractions on the hydrodynamics and sediment transport of a small, strongly tidal estuary: The Devonshire Avon. **Ocean & Coastal Management**, v. 79, p. 83–96, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.05.006>

- VAN MAREN, D. S. Grain size and sediment concentration effects on channel patterns of silt-laden rivers. **Sedimentary Geology Journal**, v. 202, p. 297–316, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.04.001>
- VIEIRA, J. M. P.; PINHO, J. L. S. Distribuição salina na embocadura e estuário do rio Lima em diferentes regimes hidrodinâmicos. **Revista Recursos Hídricos**, v. 31, n. 2, p. 5–14, 2010.
- WAN, Y.; GU, F.; WU, H.; ROELVINK, D. Hydrodynamic evolutions at the Yangtze Estuary from 1998 to 2009. **Applied Ocean Research**, v. 47, p. 291–302, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apor.2014.06.009>