

APLICAÇÃO DA HIDROINFORMÁTICA NA GESTÃO SUSTENTÁVEL DE SISTEMAS ESTUARINOS

António A. L. S. DUARTE

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 4704-553 Braga, Portugal, aduarte@civil.uminho.pt

José M. P. VIEIRA

Professor Catedrático, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 4704-553 Braga, Portugal, jvieira@civil.uminho.pt

RESUMO

Os estuários são sistemas hídricos que desde sempre favoreceram o desenvolvimento de aglomerados urbanos importantes, por propiciarem actividades com grande impacto sócio-económico e sustentarem uma intensa actividade biológica, sendo autênticos viveiros e maternidades de peixes, crustáceos e bivalves. A descarga excessiva e descontrolada de nutrientes, associada a várias acções antropogénicas, pode originar graves desequilíbrios na cadeia trófica destes ecossistemas e estimular a ocorrência de florescências macroalgais, conduzindo a uma significativa degradação dos habitats e redução da sua biodiversidade.

Os dados recolhidos nas últimas décadas no estuário do rio Mondego confirmam que as condições hidrodinâmicas podem influenciar decisivamente os processos de eutrofização em sistemas estuarinos. O tempo de residência (da água e/ou de nutrientes) nestes sistemas, caracterizados pela alternância do sentido do escoamento, tem sido amplamente reconhecido como um parâmetro-chave na avaliação da vulnerabilidade dos estuários à eutrofização.

Este trabalho teve como objectivos o desenvolvimento duma ferramenta hidroinformática (o modelo *MONDEST*), integrando três módulos principais: hidrodinâmico; de transporte (advecção e dispersão); e de cálculo de tempos de residência (*TempResid*), e a sua aplicação ao caso do estuário do rio Mondego (Portugal).

Os resultados obtidos permitem avaliar a influência das condições hidrodinâmicas e o impacto das características das descargas de nutrientes na variação da distribuição espacial dos valores dos tempos de residência estuarinos, mostrando que este modelo pode ser extremamente útil na definição criteriosa de práticas de gestão adequadas à sustentabilidade destes complexos ecossistemas aquáticos, incluindo a selecção de medidas de adaptação a alterações climáticas.

Palavras-chave: Gestão sustentável, hidroinformática, eutrofização, tempos de residência, estuário do Mondego.

1 - INTRODUÇÃO

A pressão antropogénica na área territorial da bacia hidrográfica, alterando o uso do solo, lançando águas residuais domésticas e industriais ou modificando a rede fluvial, tem sido responsável pelo incremento de cargas de nutrientes (azoto e fósforo) nas águas superficiais (VALIELA *et al.*, 1997), diminuindo a sua qualidade ambiental e incrementando a complexidade da gestão dos meios hídricos dessas regiões, sujeitos a este tipo de stress ambiental.

As águas estuarinas, resultantes da confluência de águas fluviais e marinhas, com regimes hidrodinâmicos peculiares, revelam-se favoráveis à retenção de nutrientes tornando-as particularmente vulneráveis a processos de eutrofização, comprometendo, por vezes de forma irreversível, o equilíbrio e a biodiversidade destes sistemas aquáticos. A especificidade de cada estuário justifica a necessidade de um estudo aprofundado e integrado dos processos físicos e bioquímicos que aí ocorrem, tendo como objectivo o desenvolvimento de instrumentos de gestão que permitam assegurar os padrões de qualidade da água adequados à preservação e sustentabilidade destes riquíssimos ecossistemas.

Os processos de eutrofização provocam uma redução substancial das concentrações de oxigénio dissolvido, conduzindo a situações de anaerobiose, que, em situações extremas, podem originar ambientes aquáticos anóxicos, com produção de sulfídrico, e o desenvolvimento cianobactérias (PARDAL *et al.*, 2004). Estas, ao libertarem substâncias de elevada toxicidade, reduzem a biodiversidade do ecossistema e podem comprometer os principais usos desse meio aquático, nomeadamente a sua utilização como origem para a produção de água para consumo humano (DUARTE e VIEIRA, 2004), além de induzirem uma alteração da estrutura das camadas bênticas e da própria cadeia trófica (PARDAL, 1998).

A manutenção e compatibilização dos diversos usos, porventura conflitantes, dum sistema hídrico podem ser apoiadas em novas tecnologias de suporte à decisão baseadas na integração de sistemas de informação e modelos matemáticos de simulação e optimização que constituem um recente domínio científico: a hidroinformática. Este domínio explora a interacção entre a modelação matemática e as tecnologias de informação e comunicação, no sentido de contribuir para o desenvolvimento sustentado das sociedades contemporâneas (ABBOTT, 1996). A utilização de sistemas de suporte à decisão tem conduzido a alterações significativas nas metodologias utilizadas nos processos de planeamento, projecto e tomada de decisão, que se traduz numa abordagem integrada dos cenários cada vez mais exigentes que se colocam na gestão quotidiana dos ecossistemas aquáticos (VIEIRA *et al.*, 1998).

A radiação solar, a formação de correntes horizontais e verticais, a acção do vento e o regime de caudais fluviais afectam decisivamente quer a localização das comunidades algais, quer a distribuição das fracções dissolvida e particulada dos nutrientes presentes no ecossistema aquático. Daí a necessidade de utilizar, como ferramenta, modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água aplicáveis a zonas estuarinas, dedicando especial relevância às diferentes escalas espaço-temporais características de cada um dos processos preponderantes nesses sistemas aquáticos.

Sendo os tempos de residência reconhecidos como indicadores fundamentais da hidrodinâmica estuarina e um parâmetro-chave na avaliação da vulnerabilidade dum sistema estuarino a processos de eutrofização (DETTMANN, 2001), procurou-se evidenciar a importância da variabilidade espaço-temporal dos valores do tempo de residência num dado estuário, em função de factores como os regimes dos caudais fluviais e de maré, bem como da especificidade de cada descarga em termos do, local, carga poluente, duração e período do ciclo de maré em que ela ocorre (DUARTE *et al.*, 2002).

No sentido de fazer um diagnóstico do estado trófico do estuário do rio Mondego, face aos sintomas biológicos relacionados com a alta produtividade do ecossistema verificados no interior do seu braço sul, tem-se realizado, nas últimas duas décadas, um extenso programa de monitorização, permitindo um conhecimento cada vez mais sustentado da evolução de alguns parâmetros bióticos e abióticos habitualmente associados à produção primária destes sistemas (NETO, 2004), bem como a

obtenção simultânea, sempre que possível, de dados hidrodinâmicos, de modo a permitir o estudo destas interações, seguindo a actual tendência de não dissociar estas duas importantes componentes (hidrodinâmica e qualidade da água), particularmente importantes na análise e controlo de processos de eutrofização em águas lóticas. Tratando-se de um sistema com águas pouco profundas, a hidrodinâmica do estuário do Mondego é fortemente influenciada pela batimetria, escoamento fluvial e acção da maré, determinando condições de mistura e transporte que afectam decisivamente as interações associadas aos principais processos bioquímicos associados ao crescimento algal.

Nesse sentido, o presente trabalho teve como principais objectivos desenvolver uma metodologia hidroinformática (modelo *MONDEST*) para o estudo integrado das interações entre o comportamento hidrodinâmico dos sistemas estuarinos e as alterações da sua qualidade ecológica, com especial interesse na mitigação dos processos de eutrofização, bem como a sua aplicação ao caso do estuário do rio Mondego, tendo-se para esse efeito simulado diferentes cenários (hidrodinâmicos e de qualidade da água) que poderão desempenhar um papel importante na gestão integrada de ambientes estuarinos, quando enquadrados em sistemas de suporte à decisão.

2 – ÁREA DE ESTUDO

O estuário do rio deste rio situa-se no litoral centro de Portugal, apresentando uma extensão de cerca de 30 km, entre o Açude de Formoselha e sua barra junto à cidade da Figueira da Foz. A sua zona estuarina é constituída por dois braços (norte e sul), separados pela ilha da Murraceira, com características hidrológicas muito distintas e que se reúnem, em pleno canal do porto comercial daquela cidade, a cerca de 1 km da sua embocadura (Figura 1).



Figura 1 Vista aérea da zona estuarina do rio Mondego

O braço norte é mais profundo (4 a 8 metros versus 2 a 3 m do sul, em preia-mar) e recebe o caudal fluvial do rio Mondego. O braço sul comporta-se como uma lagoa costeira, sendo a acção da maré a principal responsável pela sua hidrodinâmica, já que apenas sazonalmente recebe a descarga fluvial do rio Pranto, que é artificialmente controlada por comportas destinadas a assegurar as quantidades de água necessárias à actividade agrícola e a impedir a intrusão de água salina durante a preia-mar. A complexidade do braço sul deste estuário radica, para além da habitual reversibilidade dos escoamentos estuarinos, na elevada extensão da sua zona de sapal (que ocupa cerca de 75% da sua área total, na irregularidade da sua morfologia (contorno e batimetria) e no controlo artificial do caudal fluvial a ele afluente (Figura 2).

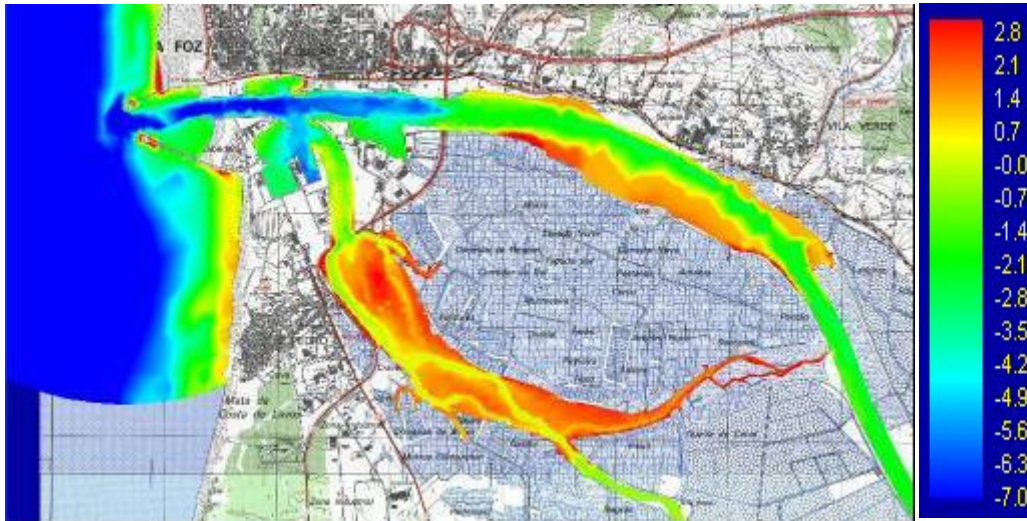


Figura 2 Batimetria da zona estuarina do rio Mondego

O processo de eutrofização verificado neste estuário associado a substituição dos bancos de macrófitas autóctones (*Zostera noltii*) por macroalgas verdes infestantes (*Enteromorpha spp.* e *Ulva spp.*), particularmente sensível nas áreas interiores do braço sul (PARDAL, 1998), deveu-se, fundamentalmente, ao efeito combinado dum processo progressivo de assoreamento por montante, que originou um incremento significativo dos respectivos valores do tempo de residência (TR), com o das actividades antropogénicas geradoras de descargas excessivas de nutrientes associadas, neste caso, à descarga de águas residuais domésticas, à aquicultura e a uma orizicultura intensiva no vale do Baixo Mondego (DUARTE, 2005).

3 – METODOLOGIA

A especificidade de cada sistema estuarino, bem como a necessidade de dispor de informação sobre os mecanismos que desencadeiam a ocorrência de florescências algais e que regulam a sua abundância tornou imprescindível a definição e realização de um programa de monitorização, quer da coluna de água quer da camada benthica e sedimentos.

O objectivo principal da monitorização visou a obtenção dum conhecimento mais sustentado sobre os potenciais factores determinantes do processo de eutrofização do braço sul deste estuário, nomeadamente, a dinâmica de nutrientes (incluindo os fluxos com a camada benthica), a biomassa algal, a insolação, a precipitação, os gradientes de salinidade e as condições hidrodinâmicas.

O facto de as florescências (*blooms*) macroalgais não terem ocorrido em anos de elevada pluviosidade, a que correspondem elevados caudais fluviais e baixas salinidades, veio acentuar a necessidade do estudo da influência da hidrodinâmica, nomeadamente dos valores dos TR de nutrientes limitantes (DUARTE *et al.*, 2001).

Os valores nulos da salinidade, observados no interior do braço sul durante as cheias de Janeiro de 2001, vieram confirmar a grande influência dos caudais de cheia dos rios Mondego e Pranto na qualidade da água deste sistema, justificando de forma inequívoca a necessidade de proceder à modelação da hidrodinâmica da totalidade do estuário e não apenas do seu braço sul, face ao dinamismo das características hidráulicas e ambientais na sua fronteira de jusante, inicialmente considerada próximo da Ponte da Gala (DUARTE *et al.*, 2004).

Sendo o estuário do rio Mondego um sistema com águas pouco profundas e geralmente bem misturado (para regimes de caudais fluviais frequentes), procedeu-se ao desenvolvimento de um

modelo matemático bidimensional (2D-H) deste sistema, designado por *MONDEST*, baseado nos programas de cálculo automático *TRIANGLE*, *RMA2* e *RMA4* (US WES-HL, 1996 e 2000) e para a resolução das equações hidrodinâmicas e de transporte de substâncias nas águas estuarinas e para a discretização espacial do sistema modelado, respectivamente.

Trata-se de um ferramenta hidroinformática que concretiza a recomendação, constante na Directiva-Quadro da Água, de se privilegiar sempre que possível a modelação integrada dos sistemas hídricos. Nesse sentido, o modelo *MONDEST* é constituído pela associação e interacção de três módulos principais: hidrodinâmico, de transporte e de cálculo do TR (*TempResid*), de modo a caracterizar a circulação estuarina (elevação da superfície livre; distribuição de velocidades, delimitação de áreas de sapal) e os processos de transporte de substâncias determinantes da qualidade da água deste estuário (Figura 3).

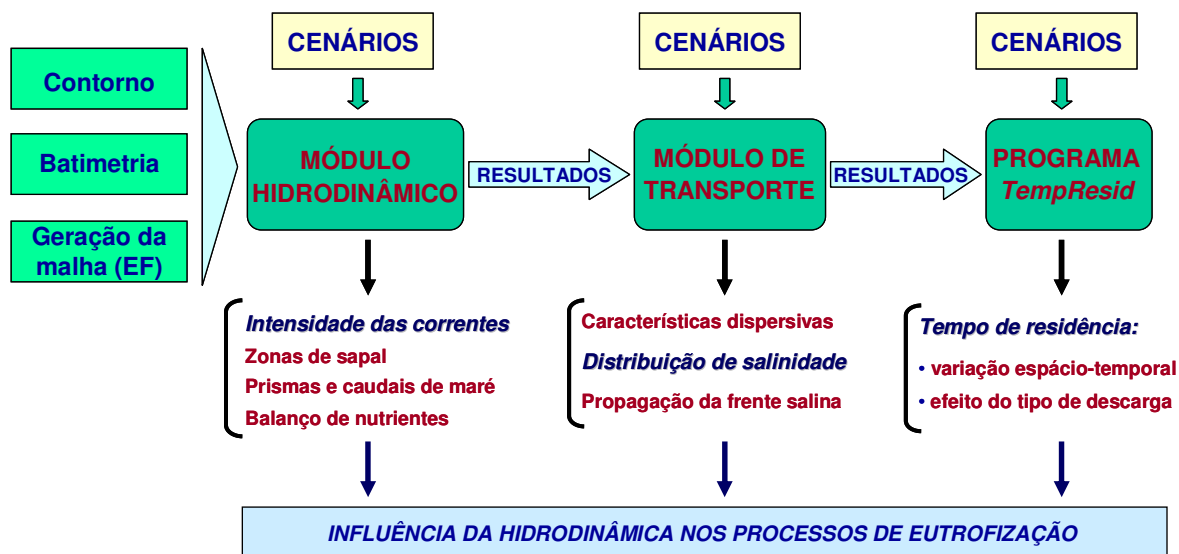


Figura 3 Esquema conceptual do modelo *MONDEST*

Saliente-se que o módulo *TempResid* foi integralmente desenvolvido no âmbito deste trabalho como uma nova abordagem de concepção, cálculo e mapeamento dos valores do tempo de residência em estuários de qualquer constituinte da água, conservativo ou não (caso dos nutrientes). Este parâmetro é calculado como o tempo necessário para que, numa qualquer célula do domínio, a concentração duma substância volte ao seu valor inicial (antes duma descarga) ou a um valor residual (1%, 10%, ...) acima dele. A reentrada da substância no sistema devida à reversibilidade do escoamento na barra do estuário é permitida e considerada nesse cálculo, pelo que houve necessidade de prolongar o domínio do modelo *MONDEST*, na sua fronteira oceânica, cerca de 3 km para o exterior da sua embocadura (DUARTE, 2005).

As principais aplicações deste modelo à gestão integrada de sistemas estuarinos podem ser sintetizadas através dos seguintes itens (DUARTE e VIEIRA, 2008b):

- Avaliação do efeito dos caudais fluviais e do regime de maré na hidrodinâmica estuarina e na distribuição do gradiente de salinidade ao longo do estuário;
- Cálculo dos prismas e dos caudais de maré, considerando o carácter dinâmico dos parâmetros hidráulicos em cada secção e a propagação da cunha salina no estuário;
- Avaliação da influência das diversas características duma descarga poluente no valor e na distribuição espacial do tempo de residência do constituinte no estuário, para cada cenário de gestão considerado;

- Avaliação do efeito das taxas de decaimento de substâncias não conservativas no valor dos seus tempos de residência no sistema estuarino;
- Identificação das zonas do estuário mais vulneráveis a processos de eutrofização, baseada na delimitação das áreas com intervalos de valores da salinidade mais favoráveis ao crescimento macroalgal e com tempos de residência de nutrientes que permitam a sua assimilação e a duplicação celular da biomassa algal presente no sistema estuarino.

Os dados de campo disponíveis relativos à elevação da superfície livre e à magnitude da velocidade serviram de base à necessária calibração e validação do módulo hidrodinâmico, tendo os valores observados da salinidade sido usados (como traçador natural) para a calibração do modelo de transporte. Uma análise de sensibilidade aos parâmetros de calibração (rugosidade, coeficientes de dispersão) foi ainda efectuada de modo a avaliar a sua influência na fiabilidade dos resultados do modelo.

Na Figura 4 apresenta-se um exemplo ilustrativo do processo de calibração, relativo à elevação da superfície livre na fronteira de montante do sistema, considerando um caudal de estiagem do rio Mondego e uma maré viva do mês de Agosto de 2005, em que se quantifica a correlação obtida entre os valores observados e os resultados do modelo *MONDEST*.

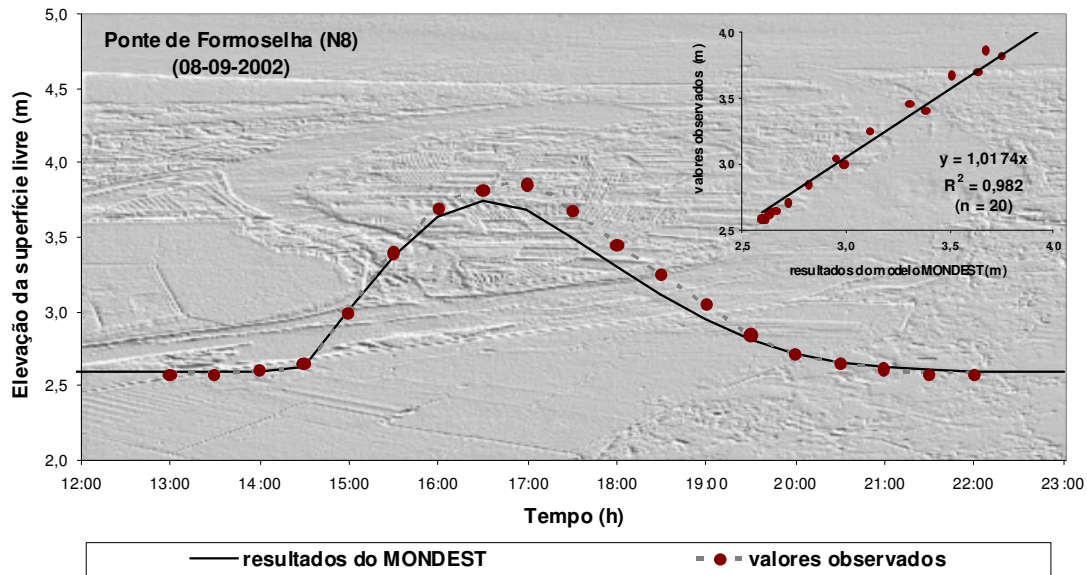


Figura 4 Calibração na fronteira montante do estuário (Ponte de Formoselha)

Na modelação da hidrodinâmica deste estuário realizaram-se dezasseis simulações, correspondentes às condições de fronteira traduzidas nos cenários definidos no Quadro 1, com o objectivo de caracterizar os campos de velocidades nos dois braços do estuário em função do tipo de maré e da variação dos caudais fluviais do rio Mondego e do rio Pranto.

A elevação do nível da água na fronteira oceânica, correspondente ao sinal da maré ao largo da Figueira da Foz, gerado a partir de programas de cálculo automático e considerando uma síntese das principais componentes harmónicas da maré.

Na análise de processos com escala temporal superior a um dia, simularam-se os efeitos da acção de marés quebradas, médias e vivas, considerando-as, em termos médios, com amplitudes características de 0,6 m, 1,15 m e 1,6 m, respectivamente.

Quadro 1: Cenários seleccionados para a análise das características hidrodinâmicas do estuário

CAUDAL FLUVIAL ($m^3.s^{-1}$)			MARÉ-TIPO	
Mondego	Pranto	Média	Viva	Quebrada
	0	H1	H2	H3
15	15	H4		
	30	H5		
75	0	H6	H7	H8
	0	H9	H10	H11
340	15	H12		
	30	H13		
500	30		H14	
800	30		H15	H16

Os caudais considerados para o rio Mondego resultam da análise efectuada aos valores médios diários observados no período 1990-2004, tendo-se adoptado: um caudal de estiagem, correspondente ao percentil 90%; o caudal médio anual (nesse período); o caudal máximo de dimensionamento do leito menor do canal principal; e um caudal de cheia, correspondente ao percentil 10%. Os valores considerados para os caudais descarregados pelo rio Pranto no braço sul, correspondem aos observados durante as campanhas de monitorização, tendo em consideração as curvas de vazão das três comportas situadas no lugar do Alvo.

Na modelação da distribuição da salinidade e da propagação da cunha salina no estuário do Mondego aplicou-se o módulo de transporte do MONDEST aos cenários hidrodinâmicos H1 a H7 e H12.

A aplicação integrada do módulo de transporte com o módulo *TempResid* teve como principais objectivos a determinação do tempo de residência (TR) de substâncias no estuário e da sua distribuição espacial para diferentes condições hidrodinâmicas, do peso relativo dos principais mecanismos físicos de transporte nos valores do TR e dos efeitos da variação das características das descargas e da natureza das substâncias nos valores do TR no braço sul do estuário. Para esse efeito foram seleccionadas as situações correspondentes aos cenários de gestão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Cenários de análise da distribuição do tempo de residência no estuário do Mondego

CENÁRIO	CAUDAL FLUVIAL ($m^3.s^{-1}$)		MARÉ-TIPO	TIPO DE DESCARGA	NATUREZA DA SUBSTÂNCIA				
	Mondego	Pranto							
TR 1	15	0	média	instantânea	conservativa				
TR 2			viva						
TR 3			quebrada						
TR 4		15	média		instantânea	não conserv. ($k=1 d^{-1}$)			
TR 5						não conserv. ($k=10 d^{-1}$)			
TR 6									
TR 7	1	0		média	contínua	conservativa			
TR 8	75								
TR 9	340								
TR 10	15		0			média	contínua	não conserv. ($k=1 d^{-1}$)	
TR 11								75	conservativa
TR 12									não conserv. ($k=1 d^{-1}$)
TR 13		não conserv. ($k=0,5 d^{-1}$)							
TR 14								não conserv. ($k=0,5 d^{-1}$)	

O conjunto de cenários TR1, TR2 e TR3 permite a avaliação do efeito da maré nos valores do TR e sua variação espacial, no caso de descargas instantâneas duma substância conservativa. Os cenários TR1, TR7, TR8 e TR9 pretendem evidenciar o contributo do caudal do rio Mondego na variação dos valores do TR relativos ao estuário e ao braço sul, prevendo-se neste subdomínio uma menor influência. Com os cenários TR10 e TR12 visa-se avaliar o efeito de descargas contínuas de substâncias conservativas através das fronteiras fluviais, comparando o seu efeito com o das descargas instantâneas (cenários TR1 e TR8, respectivamente).

Dada a natureza não conservativa da maioria dos nutrientes, efectuou-se uma análise da variação dos valores do TR resultante da consideração de diferentes comportamentos de substâncias não conservativas quando descarregadas de forma contínua com diferentes caudais do rio Mondego (cenários TR11 e TR13). No cenário TR14 apenas se considera a entrada contínua através das comportas do Alvo. O efeito do tipo de descarga no TR de substâncias não conservativas pode ser avaliado através dos resultados obtidos, nos cenários TR4 e TR11, considerando condições hidrodinâmicas semelhantes e diferentes condições (concentrações) iniciais e de fronteira.

4 – RESULTADOS

Os resultados do modelo MONDEST fornecem não só os valores de grandezas hidrodinâmicas (velocidade das correntes, profundidades, caudais e prismas de maré), mas também a distribuição espacial dos valores da salinidade e do TR para cada um dos cenários simulados. Deste modo, permitiram analisar a sensibilidade da variação do tempo de residência com as características e estratégias de descarga, visando não só a identificação das mais relevantes, mas também a validação da metodologia adoptada neste estudo, através da confirmação do gradiente de eutrofização que se verificou no braço sul deste estuário, de modo a contribuir para uma selecção das práticas mais adequadas à gestão integrada deste ecossistema estuarino. Face à enorme quantidade de informação obtida no estudo efectuado, apresentam-se neste capítulo alguns exemplos do tipo de resultados obtidos para cada fase da modelação do sistema estuarino.

Na figura 5 representa-se graficamente os resultados do modelo *MONDEST* relativos ao efeito do regime da maré (viva e quebrada) nas velocidades máximas das correntes na zona estuarina, durante a enchente.



Figura 5 Campo de velocidades máximas durante a enchente (cenários H2 e H3)

No canal a jusante da confluência dos dois braços e na zona dos Cinco Irmãos registam-se valores máximos semelhantes na intensidade das correntes, variando entre 0,3 e 0,7 m.s⁻¹. No braço sul, e apesar da maior irregularidade das secções de vazão nas áreas de sapal, há uma prevalência das velocidades máximas na zona da Gala (situada na margem esquerda, a montante da Ponte da Gala), com intensidades entre 0,35 e 0,7 m.s⁻¹.

Os resultados da modelação hidrodinâmica deste sistema estuarino confirmaram a existência de um atraso significativo do início da enchente, no braço sul em relação ao braço norte bem como uma enorme assimetria dos tempos de duração da enchente e da vazante nas zonas mais interiores do braço sul do estuário, devido à forte irregularidade da sua batimetria, em que a vazante chega a atingir cerca de 5 horas e a enchente apenas 1,5 horas (DUARTE, 2005). Na figura 6 apresenta-se a propagação da onda de maré ao longo do braço norte e do trecho fluvial do estuário devida à acção duma maré viva (cenário H2), verificando-se a existência do atraso de 1 hora na ocorrência da preia-mar. Devido ao efeito da batimetria nas secções da zona fluvial do estuário (N7 e N8), a duração da vazante pode atingir as 10 horas, originando um atraso sensível (4,5 horas) no início da enchente.

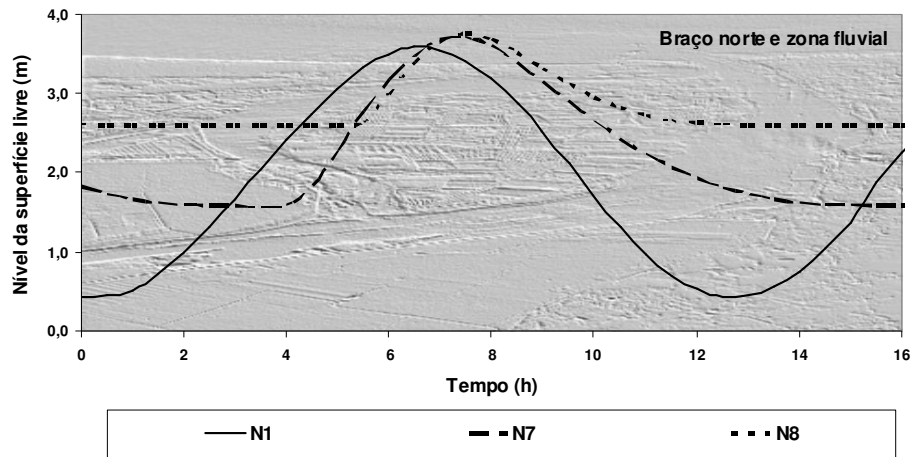


Figura 6 Efeito no nível da superfície livre (NSL) da propagação duma maré viva ao longo do estuário (N1: confluência dos dois braços; N7: Foz do rio Arunca; N8: Açude de Formoselha)

O efeito da descarga máxima de caudal do rio Pranto na distribuição da salinidade no braço sul pode, em regime de maré média, diminuir o valor máximo da salinidade em 95%, na foz do rio Pranto, e em cerca de 30%, a jusante da Ponte da Gala (DUARTE, 2005). Face a estas reduções significativas das variações obtidas para as salinidades máximas, efectuou-se uma avaliação semelhante para os respectivos valores mínimos, correspondentes ao cenário H5 durante a baixa-mar (Figura 7).

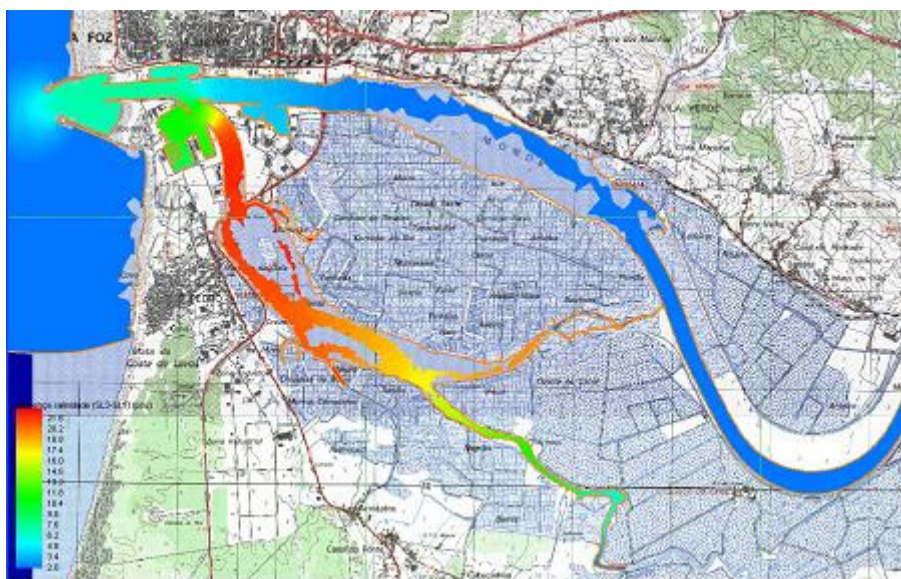


Figura 7 Efeito do caudal de cheia do rio Pranto na redução da salinidade mínima

Verifica-se que, no caso das salinidades mínimas, as maiores variações no braço sul ocorrem a jusante do esteiro dos Armazéns, até à confluência dos braços, diminuindo gradualmente até a zona da embocadura. O seu efeito deixa de ser sensível no braço norte.

Durante a maior parte do ciclo de maré, o intervalo de salinidades favorável à proliferação de macroalgas infestantes, entre 15 e 24 *psu*, (MARTINS *et al.*, 2001) ocorre, em condições de estiagem, precisamente no trecho do braço sul onde se verificou o maior gradiente de eutrofização. Pelo contrário, no trecho a montante da Ponte da Gala, raramente se verificam valores da salinidade pertencentes a esse intervalo (DUARTE e VIEIRA, 2007).

Face ao comportamento da maioria dos nutrientes como substâncias não conservativas, representa-se, na figura 8, a distribuição dos valores do TR obtida para a simulação do cenário TR13, representativo do caudal médio anual do rio Mondego e considerando uma taxa unitária de decaimento da concentração da substância descarregada pelo rio Pranto. À semelhança do verificado para outros cenários, os resultados obtidos nesta simulação permitem confirmar e reproduzir o gradiente de eutrofização identificado durante as campanhas de monitorização efectuadas no braço sul do estuário, permitem estabelecer as zonas do estuário mais sensíveis e mais vulneráveis a processos de eutrofização.

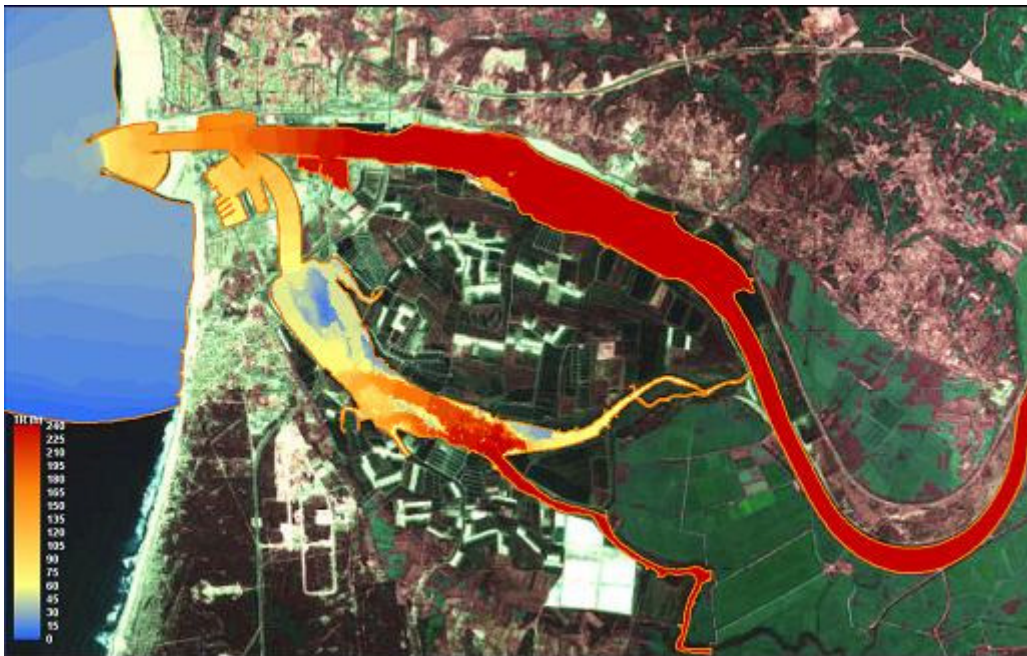


Figura 8 Valores do TR duma substância não conservativa no estuário do Mondego (cenário TR11)

O efeito do aumento do caudal do rio Mondego, que pode ser avaliado por comparação dos resultados obtidos para os cenários TR11 e TR13, traduz-se num agravamento expectável dos valores do TR que se registam no braço norte, que é substancial (400% a 800%), mas também dos valores calculados no braço sul, que registam incrementos entre 50% e 300%.

Sendo a entrada de caudal fluvial do rio Pranto artificialmente controlada por comportas existentes em ambos os braços, os resultados obtidos neste estudo deram um contributo importante na optimização dos procedimentos operacionais destas estruturas hidráulicas, ao aconselhar uma operação mais adequada das comportas do Alvo através de aberturas mais frequentes e de menor duração e ao avaliar o impacto da alternativa de descarga dos caudais do rio Pranto para o braço norte do estuário, a jusante da bifurcação dos dois braços (zona dos *Cinco Irmãos*), na variação do tempo de residência de substâncias conservativas e não conservativas (DUARTE e VIEIRA, 2009).

5 – CONCLUSÕES

O desenvolvimento do modelo *MONDEST* teve como objectivo contribuir para uma abordagem integrada e multidisciplinar dos processos geralmente associados à gestão da qualidade das águas estuarinas, permitindo quantificar o impacto de descargas domésticas industriais e/ou agrícolas potencialmente responsáveis por fenómenos de eutrofização ou pela inviabilização de alguns dos seus usos.

Esta ferramenta hidroinformática integra uma metodologia inovadora para o cálculo do tempo de residência em sistemas estuarinos, quer em termos conceptuais, quer na definição da sua variabilidade espacial e temporal, rompendo, assim, com a habitual tendência de se adoptar de um valor único desta grandeza para tipificar um determinado estuário, uma simplificação grosseira e comprovadamente inadequada na análise de fenómenos com escalas temporais da ordem de grandeza dos analisados neste estudo.

Neste trabalho faz-se uma abordagem integrada de todo o sistema estuarino, incluindo a envolvente fluvial e marinha, para uma definição mais adequada das condições de fronteira, permitindo a simulação do fenómeno de *cobre e descobre*, de modo a obter uma representação realista da acção da maré no braço sul deste estuário, que apresenta uma morfologia muito irregular e uma batimetria complexa devida à predominância de extensas áreas de sapal.

As simulações efectuadas permitiram avaliar a variação das assimetrias entre a duração da enchente e da vazante, o desfasamento temporal da propagação da maré em cada braço, a relação entre as intensidades das correntes de enchente e de vazante, a não inversão do sentido de escoamento no braço norte para caudais de cheia e o efeito directo das correntes do braço norte nas características hidrodinâmicas do braço sul e a variação transversal do módulo da velocidade média.

Os resultados do modelo *MONDEST* demonstram, na maioria dos cenários simulados, que o intervalo de salinidades mais favorável ao crescimento de macroalgas infestantes ocorre, durante grande parte do ciclo de maré, precisamente no trecho do braço sul classificado, em 1998, como hipertrófico, confirmando o gradiente de eutrofização observado neste ecossistema aquático, validando assim a metodologia aplicada.

Os valores do tempo de residência obtidos no braço sul do estuário, para os diferentes cenários simulados, permitem estabelecer as zonas mais vulneráveis à retenção de poluentes, incluindo os nutrientes (potenciadores dos processos de eutrofização), promovendo, desse modo, uma sensibilização dos gestores e dos decisores políticos para a necessidade de considerar a capacidade de renovação dos ecossistemas aquáticos na avaliação e na fixação dos limites legais dos parâmetros utilizados na caracterização das descargas de fontes poluidoras nos meios hídricos receptores.

BIBLIOGRAFIA

- ABBOTT, M. B. – “The sociotechnical dimension of hydrinformatics”, in *Hydroinformatics'96*, editado por A. Müller, A. A. Balkema. Rotterdam, 1996, pp 3-18.
- DETTMANN, E. (2001) – “Effect of water residence time on annual export and denitrification of nutrient in estuaries: a model analysis”, *Estuaries*, **24**, (4), 2001, pp. 481–490.
- DUARTE, A. A. L. S.; PINHO J. L. S.; PARDAL M. A.; NETO J. M.; VIEIRA, J. M. P.; SEABRA-SANTOS, F.S. – “Effect of Residence Times on River Mondego Estuary Eutrophication Vulnerability”. *Water Science & Technology*, **44**, (2-3), 2001, pp. 329-336.
- DUARTE A.A.L.S.; PINHO J.L.S.; VIEIRA J.M.P.; SEABRA-SANTOS F. - “Hydrodynamic modelling for Mondego estuary water quality management”, in *Aquatic ecology of the Mondego river basin. Global importance of local experience*, Capítulo 1.3, Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2002, pp. 29-42.

- DUARTE A.A.L.S.; VIEIRA J.M.P. - "Factores determinantes na avaliação de tempos de residência em estuários e sua influência em processos de eutrofização", in *Anais do 11º Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Natal (Brasil), Março 2004 (CD-Rom)
- DUARTE, A. A. L. S.- *Influência da hidrodinâmica em sistemas estuarinos sujeitos a eutrofização*, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2005.
- DUARTE A.A.L.S.; VIEIRA J.M.P. - "Impact of Nutrient Loading Characteristics on Estuarine Residence Time", in *Proceedings of 11th International Conference on Diffuse Pollution*, Belo Horizonte (Brasil), Agosto, 2007, ed. IWA (CD-Rom).
- Duarte A.A.L.S.; Vieira, J.M.P. - "A Hydroinformatic Tool for Estuarine Water Quality Management", in *Proceedings of IWA World Water Congress and Exhibition*, Viena, Áustria, 2008 (CD-Rom).
- Duarte A.A.L.S.; Vieira, J.M.P. - "Mitigation of estuarine eutrophication processes by controlling freshwater inflows", in *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, **124**, editor C. Brebbia, 2009, (on-line).
- MARTINS, I.; PARDAL, M.A.; LILLEBO, A.I.; FLINDT, M.R.; MARQUES, J.C. - "Hydrodynamics as a major factor controlling the occurrence of green macroalgal blooms in a eutrophic estuary: a case study on the influence of precipitation and river management", *Estuarine Coastal & Shelf Science* **52**, 2001, pp. 165-177.
- NETO, J. M. - *Nutrient enrichment in a temperate macro-tidal system. Scenario analysis and contribution to coastal management*, Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2004.
- PARDAL M.A. (1998). *Eutrophication impact on macrobenthic communities of Mondego estuary south arm (Portugal)*. Tese de Doutoramento. Universidade de Coimbra, Portugal, 1998.
- PARDAL M.A.; CARDOSO P.G.; SOUSA J.P.; MARQUES J.C.; RAFFAELLI D. - "Assessing environmental quality: a novel approach", *Marine Ecology Progress Series*, **267**, 2004, pp. 1-8.
- VIEIRA J.P.; PINHO J.S.; DUARTE A.A.L.S. - "Eutrophication Vulnerability Analysis: A Case Study", *Water Science and Technology*, **37**, (3), 1998, pp. 121-128.
- WES-HL - *Users Guide to RMA2 Version 4.3* US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory, Vicksburg, USA, 1996.
- WES-HL - *Users Guide to RMA4 WES Version 4.5*, editado pela US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory, Vicksburg, USA, 2000.
- VALIELA, I.; McCLELLAND, J.; HAUXWELL, J.; BEHR, P.J.; Hersh, D.; FOREMAN, K. - "Macroalgae blooms in shallow estuaries: Controls and ecophysiological and ecosystem consequences" , in *Limnology & Oceanography*, **42**, 1997, pp. 1105-1118.