

VI-067 - A IMPORTÂNCIA DA HIDRODINÂMICA NA DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE DESCARGA EM AMBIENTES ESTUARINOS. CASO DE ESTUDO

António A. L. Sampaio Duarte⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Portugal. Doutor em Engenharia Civil, ramo Hidráulica e Ambiente, pela Universidade do Minho, Braga, Portugal. Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga, Portugal.

José M. P. Vieira

Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Portugal. Mestre em Engenharia Sanitária pela Delft University of Technology, Holanda. Doutor em Engenharia Civil, ramo Hidráulica e Ambiente, pela Universidade do Minho, Braga, Portugal. Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga, Portugal.

Endereço⁽¹⁾: Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal - Telefone: (351) 253 604 728 – correio-e: aduarte@civil.uminho.pt

RESUMO

Os processos físicos associados à circulação e transporte das águas estuarinas têm uma influência significativa na variação dos indicadores de qualidade da água e, conseqüentemente, no seu estado ecológico.

Os processos de eutrofização dos ambientes estuarinos estão muitas vezes associados ao efeito combinado do assoreamento dos seus braços, responsável pelo incremento significativo dos respectivos valores do tempo de residência, com o das actividades antropogénicas geradoras de descargas excessivas de nutrientes, provenientes da lixiviação dos terrenos agrícolas e do lançamento de águas residuais domésticas. Este fenómeno pode provocar, além dum aumento da cor e turvação, uma redução das concentrações de oxigénio dissolvido e da biodiversidade, favorecendo, sazonalmente, a ocorrência de florescências algais e conseqüente libertação de substâncias tóxicas (neurotoxinas), pondo em risco a utilização dessas águas como origem dos sistemas de abastecimento de água para consumo humano.

Esta comunicação insere-se no âmbito do estudo da influência da hidrodinâmica na vulnerabilidade de sistemas estuarinos a processos de eutrofização, aplicado ao caso do estuário do rio Mondego, e tem como principais objectivos demonstrar a importância da consideração dos mecanismos de transporte e de dispersão dos meios hídricos receptores na definição de estratégias de descarga de cargas poluentes (local, momento, intensidade, duração) e sensibilizar os gestores e os decisores políticos para a necessidade de considerar a capacidade de renovação destes ecossistemas aquáticos quando da fixação dos limites legais dos parâmetros utilizados para caracterizar as descargas de fontes poluidoras. Na verdade, a severidade duma descarga não deve ser caracterizada apenas em função da concentração de cada poluente (conforme prescrito na legislação europeia), mas sim das respectivas cargas e sobretudo da capacidade de renovação do meio hídrico receptor.

PALAVRAS-CHAVE: Estuários, hidroinformática, eutrofização, estratégias de descarga, tempo de residência, modelo *MONDEST*.

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, diminuindo a sua qualidade ambiental e incrementando a complexidade da gestão dos meios hídricos dessas regiões.

As águas estuarinas, resultantes da confluência de águas fluviais e marinhas, com regimes hidrodinâmicos peculiares, revelam-se favoráveis à retenção de nutrientes tornando-se muito vulneráveis a factores de *stress* ambiental, que podem por em causa o equilíbrio destes ecossistemas aquáticos.

O incremento progressivo das descargas tem conseqüências gravosas no estado ecológico das águas estuarinas, ao desencadear processos de eutrofização dessas massas hídricas, capazes de potenciar a ocorrência de florescências algais e/ou a alteração da estrutura das comunidades macrobentónicas, provoca uma redução substancial das concentrações de oxigénio dissolvido, conduzindo a situações de anaerobiose,

que, em situações extremas, levam à ocorrência de ambientes anóxicos, com produção de sulfídrico, e ao desenvolvimento cianobactérias, que, ao libertarem substâncias de elevada toxicidade, colocam em risco a biodiversidade do ecossistema e a utilização desse meio hídrico como origem de abastecimento de água para consumo humano.

A compatibilização dos diversos usos, porventura conflitantes, pode ser apoiada 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. A utilização de sistemas de suporte à decisão, beneficiando do formidável progresso verificado nas tecnologias de informação e comunicação, 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 estuarinos.

O processo eutrofização da zona estuarina do rio Mondego (Figura 1), particular sensível nas áreas interiores do seu braço sul, deveu-se ao efeito combinado do seu progressivo 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 Baixo Mondego (Duarte, 2005). Tratando-se de um sistema com águas pouco profundas, o seu regime hidrodinâmico é fortemente influenciado pelo escoamento fluvial dos rios Mondego e Pranto (particularmente relevante em situações de cheia), pela irregularidade da sua batimetria e pela acção da maré (principalmente no braço sul), determinando condições de mistura e transporte que afectam as interações associadas aos principais processos biogeoquímicos.



Figura 1: Vista aérea da zona estuarina do rio Mondego

Este fenómeno, associado à descarga de matéria orgânica refractária pelas Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) existentes, pode provocar, além dum aumento da cor e turvação, uma redução das concentrações de oxigénio dissolvido e da biodiversidade, favorecendo, sazonalmente, a proliferação de algas libertadoras de substâncias tóxicas (neurotoxinas), pondo em risco a utilização dessas águas para consumo humano e o próprio funcionamento de eventuais Estações de Tratamento de Água (ETA).

Esta comunicação insere-se no âmbito do estudo da influência da hidrodinâmica na vulnerabilidade de sistemas estuarinos a processos de eutrofização e tem como principal objectivo demonstrar a importância da consideração do comportamento hidrodinâmico dos meios hídricos receptores na definição de estratégias de descarga de cargas poluentes, de modo a sensibilizar os gestores e os decisores políticos para a necessidade de considerar a capacidade de renovação destes ecossistemas aquáticos quando da fixação dos limites legais dos parâmetros utilizados na caracterização das descargas de fontes poluidoras. Neste trabalho referem-se os procedimentos relativos à modelação hidrodinâmica (2D-H) deste sistema estuarino e procura-se evidenciar que a adopção de um tempo de residência único para os estuários constitui uma simplificação grosseira, ao negligenciar a sua variabilidade espaço-temporal, originada quer pela variação dos caudais fluviais e das características da maré, quer pela especificidade de cada descarga (local, carga poluente, duração e período do ciclo de maré em que ela ocorre).

MATERIAIS E MÉTODOS

No sentido de fazer um diagnóstico do estado trófico do estuário do Mondego, foram desenvolvidas, nas últimas décadas, várias campanhas de amostragem, cujos resultados permitem sustentar um conhecimento mais aprofundados da dinâmica dos processos associados à produção primária e secundária neste ecossistema e estabelecer um gradiente de eutrofização nas áreas mais interiores do seu braço sul (Neto, 2004). Por outro lado, estas campanhas tiveram também como objectivo obter, sempre que possível, dados hidrodinâmicos em simultâneo com os de qualidade da água de modo a permitir o estudo destas interacções, seguindo a actual tendência de não dissociar estas duas importantes componentes quando se analisam e se pretende mitigar os efeitos, por vezes irreversíveis dos processos de eutrofização em águas lólicas.

O facto de as florecências (*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 do TR de nutrientes limitantes, nestas ocorrências e no processo de eutrofização em geral (Duarte *et al.*, 2001). Os valores nulos da salinidade, observados no interior do braço sul, vieram confirmar a grande influência dos caudais de cheia dos rios Mondego e Pranto na qualidade da água deste sistema, justificando de forma inequívoca da necessário de proceder à modelação da hidrodinâmica da totalidade do estuário e não apenas do seu braço sul, face ao dinamismo das características hidráulicas na sua fronteira de jusante (Duarte *et al.*, 2004). A complexidade 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 área total do estuário), sujeita a fenómenos de *cobre-descobre*, e na irregularidade do seu contorno e batimetria.

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, baseado nos programas de cálculo automático *RMA2* e *RMA4* (US WESHL, 1996), designado por *MONDEST* e constituído pela integração de três módulos – hidrodinâmico, de transporte e de cálculo do TR (*TempResid*), de modo a caracterizar a circulação estuarina e os processos de transporte de substâncias determinantes da qualidade da água deste estuário (Figura 2).

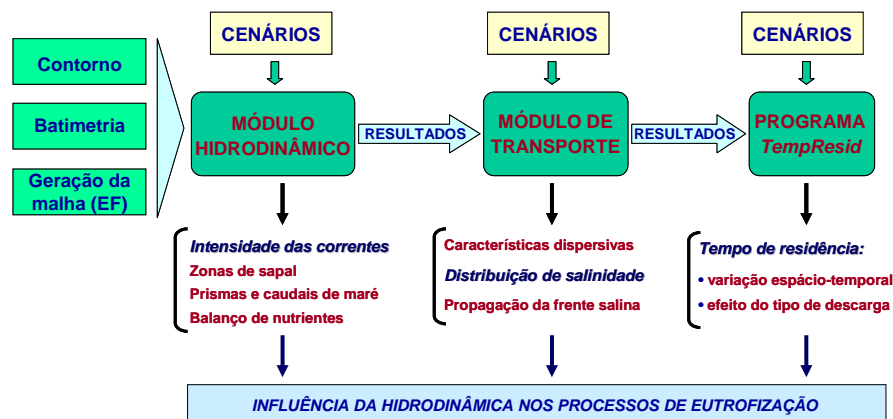


Figura 2: Esquema conceptual do modelo *MONDEST*

O domínio do modelo *MONDEST* estende-se ao longo duma extensão total de cerca de 35 km, desde a sua fronteira oceânica (prolongada cerca de 3 km para o exterior da embocadura) até à Ponte de Pereira, cerca de 2,8 km a montante da Ponte de Formoselha (em Montemor-o-Velho) e do açude que aí interrompe a propagação da onda de maré para montante.

Os dados de campo disponíveis relativos à altura de água e às velocidades serviram de base à necessária calibração e validação do módulo hidrodinâmico, tendo os valores observados da salinidade sido usados (como traçador) para a calibração do modelo de transporte. Na Figura 3 apresenta-se o contorno considerado para a zona estuarina, bem como a localização das várias secções utilizadas quer na calibração e validação do modelo, quer na análise temporal dos resultados das simulações (Duarte, 2005).

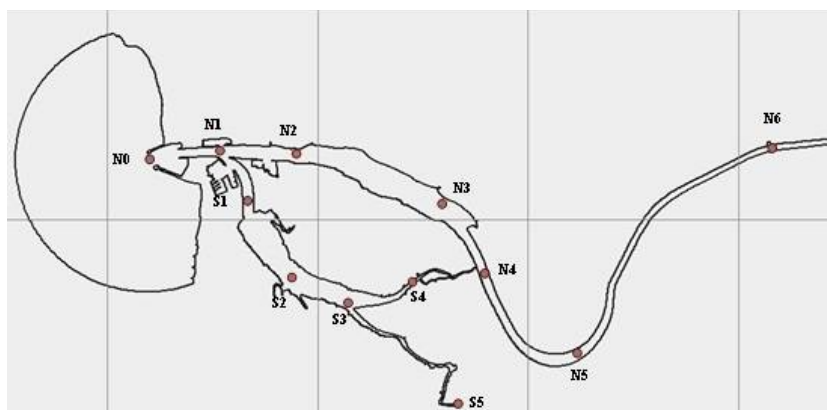


Figura 3: Contorno relativo à zona estuarina e localização das secções de controlo

A calibração e validação da componente hidrodinâmica do modelo MONDEST incluiu uma análise de sensibilidade aos diferentes parâmetros de calibração, que incidiu sobre o efeito da variação do coeficiente de rugosidade de Manning (n) e do coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal ($E_h = E_x = E_y$) (médio na vertical) nos níveis da superfície livre (NSL) e no módulo da velocidade média (MVM) da corrente, para um regime de maré média e considerando o valor médio anual do caudal do rio Mondego.

A título de exemplo, apresenta-se, na Figura 4, os resultados dessa análise que permitiram identificar as zonas mais sensíveis à variação do NSL com o coeficiente de rugosidade, localizadas no braço sul, aumentando essa sensibilidade para montante em ambos os braços, devido ao efeito da batimetria (menores profundidades), variando as diferenças médias entre 0,6% (em N1) e 11,2% (no braço sul, em S3), com uma diferença máxima de 27,5% (em N4).

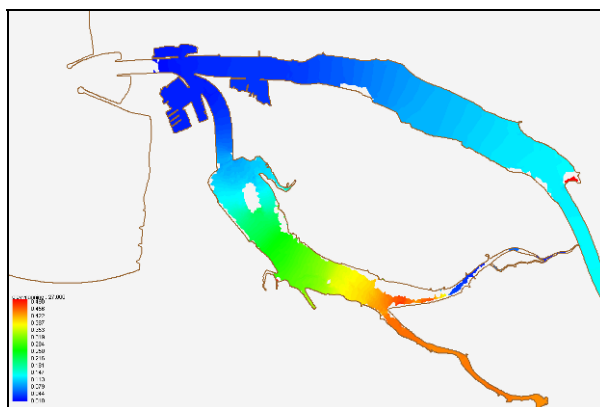


Figura 4: Contorno relativo à zona estuarina e localização das secções de controlo

Após a calibração do modelo *MONDEST*, foram efectuadas várias simulações correspondentes a diferentes cenários hidrodinâmicos e de descarga de nutrientes, de modo a 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.

RESULTADOS

Na modelação da hidrodinâmica deste estuário procedeu-se à realização de dezasseis simulações, de acordo com os cenários definidos na Tabela 1, utilizando o módulo hidrodinâmico do modelo *MONDEST*, para 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.

Tabela 1: Cenários para a análise das características hidrodinâmicas do estuário

CAUDAL FLUVIAL (m ³ .s ⁻¹)			MARÉ-TIPO	
Mondego	Pranto	Média	Viva	Quebrada
	0	H 1	H 2	H 3
15	15	H 4		
	30	H 5		
75	0	H 6	H 7	H 8
	0	H 9	H 10	H 11
340	15	H 12		
	30	H 13		
500	30		H 14	
800	30		H 15	H 16

A título de exemplo, apresenta-se na Figura 5 os resultados obtidos para o cenário H9, relativos ao campo de velocidades máximas durante a vazante.

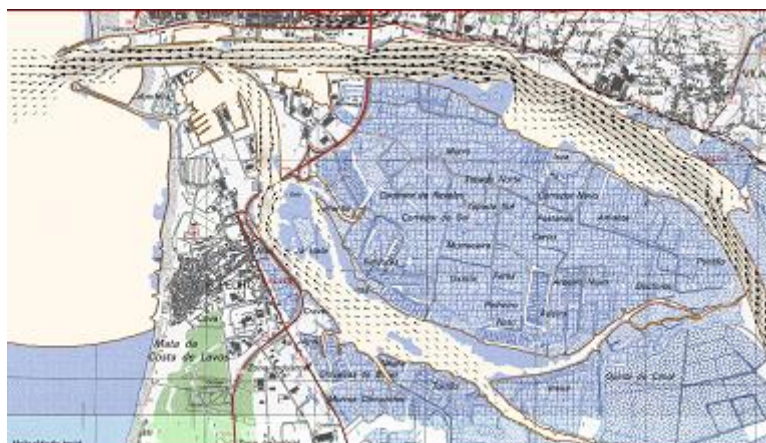


Figura 5: campo de velocidades máximas durante a vazante (cenário H9)

Além disso, procurou-se estimar os caudais de maré na enchente e na vazante através do cálculo dos prismas de maré em várias secções, tendo em consideração as prováveis variações nas assimetrias que se verificam nas durações da enchente e da vazante.

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.

Os resultados do modelo 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.

Na Figura 6 representa-se, a título exemplificativo, para situações de estiagem, os resultados que demonstram a grande influência do efeito do caudal do rio Pranto nos valores do TR do braço sul do estuário, e que, à semelhança dos resultados obtidos para vários outros cenários, permitiram confirmar e reproduzir o gradiente de eutrofização diagnosticado nas campanhas de monitorização oportunamente efectuadas.

Sendo a entrada de caudal fluvial do rio Pranto artificialmente controlada por comportas (em ambos os braços), os resultados obtidos neste trabalho poderão dar um contributo importante na optimização dos procedimentos operacionais destas estruturas hidráulicas, aconselhando, por exemplo, que a operação adequada das comportas do Alvo passa por aberturas mais frequentes e de menor duração (Duarte *et al.*, 2002).



Figura 6: Efeito do caudal do rio Pranto nos tempos de residência do estuário

A comparação dos resultados obtidos nos cenários destinados à quantificação do efeito do aumento da intensidade duma descarga instantânea na variação dos valores do TR permitiu elaborar a Tabela 2, que ilustra o facto de os valores do TR sofrerem um agravamento máximo de 94% quando o valor da intensidade da descarga quintuplica e de apenas 38%, quando essa intensidade duplica.

Tabela 2: Cenários para a análise das características hidrodinâmicas do estuário

ESTAÇÃO	Intensidade 100		Intensidade 200		Intensidade 500	
	Tempo de residência (h)	Tempo de residência (h)	Agravamento (%)	Tempo de residência (h)	Agravamento (%)	
N0	84	116	38	163	94	
N1	116	153	32	201	73	
N2	153	185	21	224	46	
N3	165	191	16	226	37	
S1	152	187	23	228	50	
S3	175	211	21	240	37	

Em termos gerais, pode-se afirmar que, para estes cenários, os maiores agravamentos dos valores do TR ocorrem na embocadura do estuário, como também se pode constatar através da Figura 6.21, e os menores agravamentos ocorrem nas zonas mais interiores de ambos os braços do estuário.

CONCLUSÕES

Com base no estudo realizado, concluiu-se que:

Para caudais de estiagem, a maré constitui o mecanismo de transporte mais importante nos dois braços do estuário, sendo dominante no braço sul, desde que não ocorram descargas do rio Pranto neste braço. Nesse caso, o contributo relativo dos dois caudais fluviais em relação à maré aumenta de 30% para 96%.

Os resultados do modelo MONDEST confirmaram o gradiente de eutrofização observado no braço sul do estuário do Mondego, validando assim a metodologia aplicada.

A duração das descargas é um dos factores determinantes da variação do TR, pelo que uma operação adequada das comportas do Alvo passa por aberturas mais frequentes mas de menor duração. Em situações de estiagem, o efeito do aumento da intensidade duma descarga instantânea nos valores do TR traduz-se num agravamento máximo de 94% quando o seu valor quintuplica e de apenas 38%, quando essa intensidade duplica.

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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Duarte A. A. L. S.. Influência da hidrodinâmica em sistemas estuarinos sujeitos a eutrofização. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga, Portugal, Maio de 2005.
2. Duarte A.A.L.S., Pinho J.L.S., Vieira J.M.P., Seabra-Santos F., 2002. Hydrodynamic modelling for Mondego estuary water quality management. In Aquatic ecology of the Mondego river basin. Global importance of local experience. Capítulo 1.3, 29-42, Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
3. 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 and Technology, 44, (2-3), 329-336, 2001.
4. 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.