

APLICAÇÃO DA MODELAÇÃO MATEMÁTICA AO CÁLCULO DE CAUDAIS E PRISMAS DE MARÉ EM SISTEMAS ESTUARINOS

António A. L. S. DUARTE;

Professor Auxiliar, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, aduarte@civil.uminho.pt

José M. P. VIEIRA

Professor Catedrático, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, jvieira@civil.uminho.pt

RESUMO

Os processos físicos associados à dinâmica das águas estuarinas têm uma influência significativa na variação da sua qualidade química e do seu estado ecológico, sendo a eutrofização desses meios hídricos consensualmente reconhecida como um problema actual à escala global, originado pelo incremento de actividades antropogénicas geradoras de descargas excessivas de nutrientes nos meios receptores, que, em situações extremas, podem conduzir à ocorrência de ambientes anóxicos e à proliferação de cianobactérias, que, ao libertarem substâncias de elevada toxicidade, colocam em risco a biodiversidade do ecossistema e a utilização desse meio hídrico como origem de água para abastecimento.

No âmbito de um estudo sobre a influência da hidrodinâmica no estado trófico do estuário do rio Mondego, face ao gradiente de eutrofização observado no interior do seu braço sul, foi desenvolvido o modelo MONDEST (integrando hidrodinâmica e qualidade da água) com o objectivo de sustentar e aprofundar o conhecimento da dinâmica dos processos associados à produção primária e secundária neste ecossistema, considerando cenários de gestão definidos criteriosamente em função dos diferentes regimes de maré e de caudal fluvial.

Neste trabalho foi dada especial atenção à determinação da variação espacial das assimetrias dos períodos de enchente e de vazante ao longo do estuário, para cada cenário, de modo a obter um cálculo mais rigoroso dos caudais e prismas de maré, que considera a dinâmica dos parâmetros hidráulicos ao longo do ciclo de maré. Em vez de se adoptarem secções de vazão médias no cálculo de caudais de maré médios e com eles se proceder à determinação do prisma de maré, preconiza-se uma nova metodologia que inverte este processo de cálculo, partindo do cálculo automático dos prismas de maré e das durações reais da enchente e da vazante, correspondentes aos volumes máximos e mínimos de água existentes em cada subdomínio do estuário. Estes volumes variam em função da batimetria (principalmente nas vastas áreas de sapal do braço sul), da amplitude da maré e da grandeza dos caudais fluviais que afluem a esse estuário, factor este muitas vezes negligenciado em estudos visando a determinação dos prismas de maré em sistemas estuarinos.

Palavras-chave: modelação matemática, hidrodinâmica, prisma de maré, estuário do rio Mondego, *MONDEST*.

1 - INTRODUÇÃO

As águas estuarinas, resultantes da confluência de águas fluviais e marinhas, apresentam regimes hidrodinâmicos peculiares e, ao favorecer a retenção e acumulação de poluentes, revelam-se muito vulneráveis a factores de stress ambiental que podem por em causa o equilíbrio destes ecossistemas aquáticos.

O processo de eutrofização da zona estuarina do rio Mondego (Figura 1), particularmente sensível, durante a década de 90, 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 (DUARTE e VIEIRA, 2009), com o das actividades antropogénicas geradoras de descargas excessivas de nutrientes provenientes da descarga de águas residuais, da aquicultura e a uma orizicultura intensiva existente no Baixo Mondego (PARDAL, 1998).



Figura 1 Vista aérea da zona estuarina do rio Mondego (Figueira da Foz)

A compatibilização dos diversos usos, geralmente conflitantes, pode ser apoiada por 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 (VIEIRA, 1999), beneficiando do acentuado 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 (DUARTE e VIEIRA, 2008).

Esta comunicação insere-se no âmbito do estudo da influência da hidrodinâmica na vulnerabilidade de sistemas estuarinos a processos de eutrofização (DUARTE, 2005), que permitiu evidenciar a importância da consideração do comportamento hidrodinâmico dos sistemas estuarinos 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 (DUARTE e VIEIRA, 2007).

Trabalhos anteriores (OLIVEIRA e BAPTISTA, 1997; DETTMAN, 2001, DUARTE, 2005,) demonstraram inequivocamente que a adopção de um tempo de residência único para os estuários

constitui uma simplificação grosseira na análise integrada do estado trófico das águas estuarinas, 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).

Na determinação dos valores do tempo de residência (TR) podem ser adoptados métodos empíricos e computacionais (WANG *et al.*, 2004), propondo-se neste trabalho uma abordagem alternativa que utiliza a capacidade crescente dos modelos numéricos para estimarem o tempo de residência de substâncias conservativas e não conservativas, através da analogia com a advecção e dispersão de marcadores, em que a avaliação dos valores dos caudais de maré e do prisma de maré, de forma dinâmica, é essencial e imprescindível numa estimativa mais rigorosa de balanços de massa, nomeadamente de nutrientes, numa escala temporal alargada.

Neste trabalho apresentam-se os resultados relativos à modelação hidrodinâmica deste sistema estuarino, incluindo os respectivos procedimentos de calibração e validação, e à aplicação duma metodologia inovadora de quantificação dos caudais e prismas de maré, recorrendo ao modelo *MONDEST*, baseada na consideração da dinâmica dos parâmetros hidráulicos ao longo dum ciclo de maré e cada local do estuário. Estes resultados permitiram estabelecer fórmulas de cálculo do prisma de maré em ambos os braços do estuário do Mondego e retirar algumas conclusões relativas ao efeito da batimetria do estuário, do regime de maré e dos caudais fluviais afluentes no comportamento hidrodinâmico do estuário do rio Mondego.

2 - METODOLOGIA

2.1 – Caracterização da área de estudo

O rio Mondego drena uma bacia hidrográfica com uma área de cerca de 6670 km² e uma precipitação média anual entre 1000 e 1200 mm. O seu estuário, objecto deste trabalho, prolonga-se numa extensão de cerca de 32 km, desde a sua fronteira oceânica 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 (Figura 2).



Figura 2 Zona de montante do estuário do Mondego (Ponte e açude de Formoselha)

Na zona dos *Cinco Irmãos* (cerca de 5 km a montante da sua embocadura oceânica), o estuário bifurca em dois braços (norte e sul), separados pela ilha da Murraceira, com características hidráulicas muito distintas e que confluem a cerca de 1 km da barra. O braço norte, que recebe o caudal fluvial do rio Mondego, é mais profundo (4 a 8 metros versus 2 a 3 m, em preia-mar) do que o braço sul, que devido ao progressivo assoreamento na sua secção de montante do braço sul, quase só recebe o caudal fluvial do rio Pranto. A descarga dos caudais do rio Pranto é controlada pelas comportas do *Alvo* (braço sul) e da *Maria da Mata* (braço norte) com o objectivo de regular as quantidades de água necessárias à orizicultura e a impedir a intrusão de água salina durante a preia-mar.

Permanecendo estas comportas encerradas em grande parte do ano, o braço sul comporta-se como uma lagoa costeira, apresentando-se bem misturado, com tempos de residência muito superiores aos verificados no braço norte, facto que aumentou substancialmente a sua vulnerabilidade a processos de eutrofização por macroalgas infestantes (DUARTE, 2005).

A complexidade deste estuário radica, para além da habitual reversibilidade dos escoamentos estuarinos, na sua irregularidade morfológica, tanto do contorno como da batimetria (Figura 3) e na elevada extensão da sua zona de sapal (que ocupa cerca de 75% da área total do estuário), sujeita a periódicos fenómenos de *cobre-descobre*.

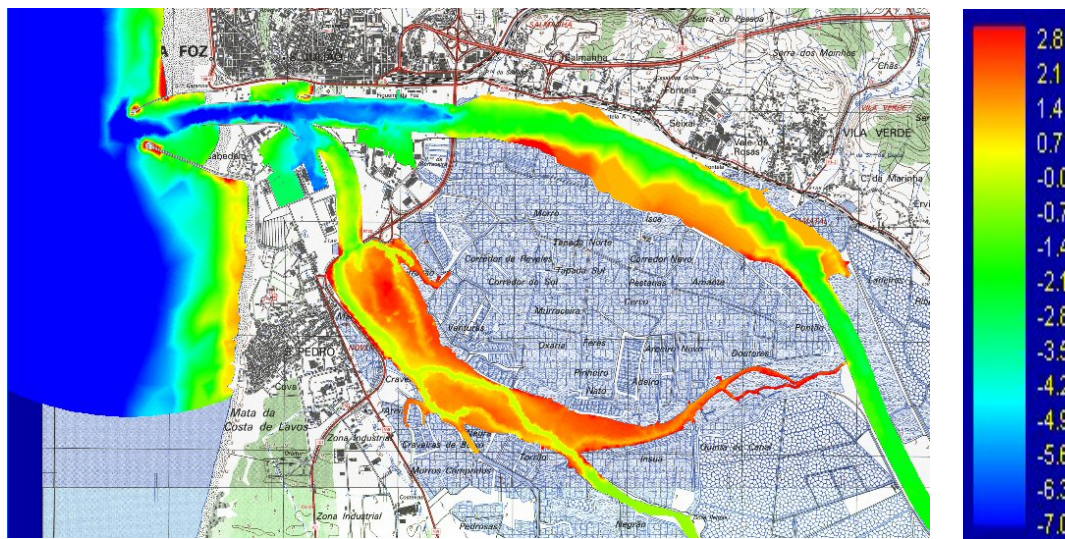


Figura 3 Batimetria da zona estuarina do rio Mondego

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 aprofundado da dinâmica dos processos associados à produção primária e secundária neste ecossistema (Neto, 2004). Nessas campanhas houve a preocupação de se obter, sempre que possível, dados hidrodinâmicos em simultâneo com os de qualidade da água, de modo a permitir o estudo destas interações, 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 florescências 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, nos processos de eutrofização (DUARTE *et al.*, 2001).

2.2 – Modelo *MONDEST*

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 WES-HL, 1996 e 2000), 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 4).

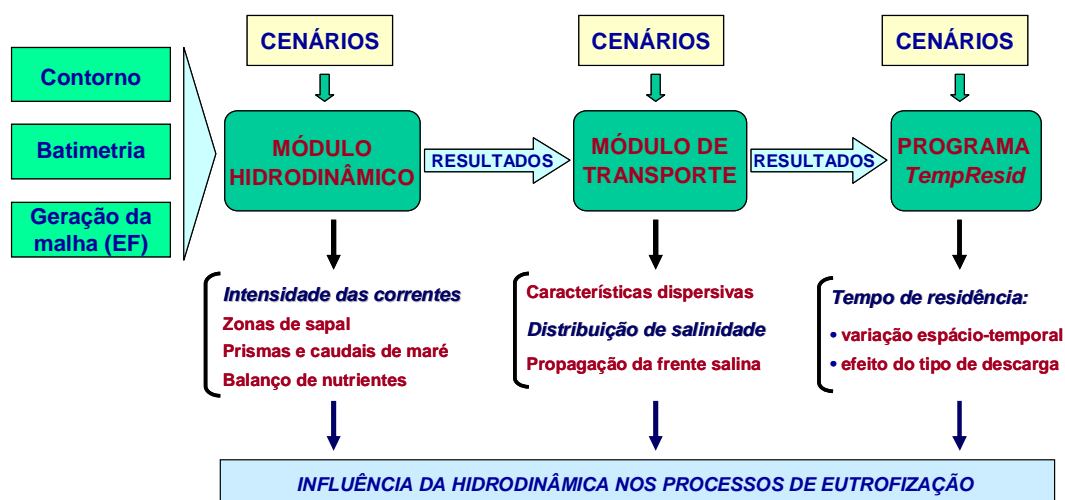


Figura 4 Esquema conceptual do modelo *MONDEST*

No modelo *MONDEST* adoptou-se uma malha de elementos finitos não estruturada, composta por elementos triangulares, tendo como critério de refinamento a imposição de áreas máximas e de ângulos internos mínimos para os seus elementos (Figura 5). Na zona fluvial e no braço norte, os valores impostos foram de 10 000 m² e de 25°, respectivamente. Atendendo à maior quantidade de dados batimétricos no braço sul e sendo este braço o objecto preferencial na análise do seu estado trófico, efectuou-se, neste subdomínio, um refinamento da malha de elementos finitos, reduzindo o valor máximo da área dos seus elementos a 500 m².



Figura 5 Malha de elementos finitos do domínio do modelo *MONDEST*

As condições de fronteira consideradas no modelo *MONDEST* referem-se aos caudais fluviais dos rios Mondego, Arunca e Pranto e à elevação do nível da água na fronteira oceânica, correspondente ao sinal da maré ao largo da Figueira da Foz, gerado a partir do programa *SR95* para o período em análise, considerando uma síntese das principais componentes harmónicas da maré.

A calibração do modelo *MONDEST* foi efectuada através de sucessivas simulações com diferentes pares de valores, relativos aos parâmetros de calibração (coeficiente de rugosidade de *Manning*, n , e coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal, $E_h=E_x=E_y$), visando o melhor ajuste possível entre os resultados dessas simulações e a série de dados de campo mais extensa, referente a medições simultâneas em três estações de amostragem no braço sul (Lota, esteiro dos Armazéns e Foz do Pranto). Foi ainda efectuada uma cuidadosa análise de sensibilidade aos parâmetros de calibração incidindo sobre o efeito da sua variação 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. Para cada uma das simulações esses coeficientes foram considerados constantes em todo o domínio, correspondendo as várias simulações efectuadas à variação de um desses dois parâmetros mantendo constante o outro.

2.3 – Cenários de simulação

Na modelação da hidrodinâmica deste estuário procedeu-se à realização de dezasseis simulações, utilizando o 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 (Quadro 1).

Quadro 1 Cenários para a análise das características hidrodinâmicas do estuário do Mondego

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

Dado que se pretendeu analisar processos bioquímicos 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 de 0,6 m, 1,15 m e 1,6 m, respectivamente.

Os caudais considerados para o rio Mondego resultam da análise aos valores médios diários observados no período 1990-2004, tendo-se adoptado os seguintes valores: $15 m^3.s^{-1}$, como caudal de estiagem, correspondente ao percentil 90% (na curva de caudais acumulados); $75 m^3.s^{-1}$, como valor médio anual; $340 m^3.s^{-1}$, como caudal máximo de dimensionamento do leito menor do canal principal; 500 e $800 m^3.s^{-1}$ como caudais de cheia. Os caudais descarregados pelo rio Pranto no braço sul, correspondem aos observados durante as campanhas, tendo em consideração as curvas de vazão das comportas do *Alvo*. Assim, admitiram-se os valores médios diários de 0 (comportas fechadas), 15 e $30 m^3.s^{-1}$, correspondentes, respectivamente, a descargas efectuadas durante parte do ciclo de maré e a descargas em contínuo (habituais em períodos de maior pluviosidade).

3 – RESULTADOS

As simulações efectuadas permitiram avaliar vários aspectos específicos do comportamento hidrodinâmico deste estuário, tais como: a variação das assimetrias entre a duração da enchente e da vazante ao longo dos dois braços; o desfasamento temporal da propagação da maré em cada braço e entre ambos; a não inversão do sentido de escoamento no braço norte para caudais de cheia; a relação entre as intensidades das correntes de enchente e de vazante; o efeito directo das correntes do braço norte na circulação do braço sul; e a variação transversal do módulo da velocidade média, nomeadamente no braço sul. Como foi referido, neste artigo será dado especial relevo aos resultados obtidos na quantificação dos caudais e prismas de maré, que serviram de base a uma proposta de fórmulas a adoptar neste sistema estuarino.

No que se refere à fase prévia de calibração e validação do módulo hidrodinâmico do modelo *MONDEST*, verificou-se que melhor correlação entre os níveis da superfície livre observados e os resultados obtidos com o modelo hidrodinâmico ($r \geq 0,96$) ocorreu para a simulação em que se considerou um valor para o coeficiente de rugosidade de *Manning* igual a $0,02 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ e um valor do coeficiente de viscosidade turbulenta igual a $20 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, para todo o domínio (Figura 6). Duma forma geral, a concordância entre os valores observados e calculados tende a diminuir com o afastamento à fronteira oceânica devido à diminuição das profundidades.

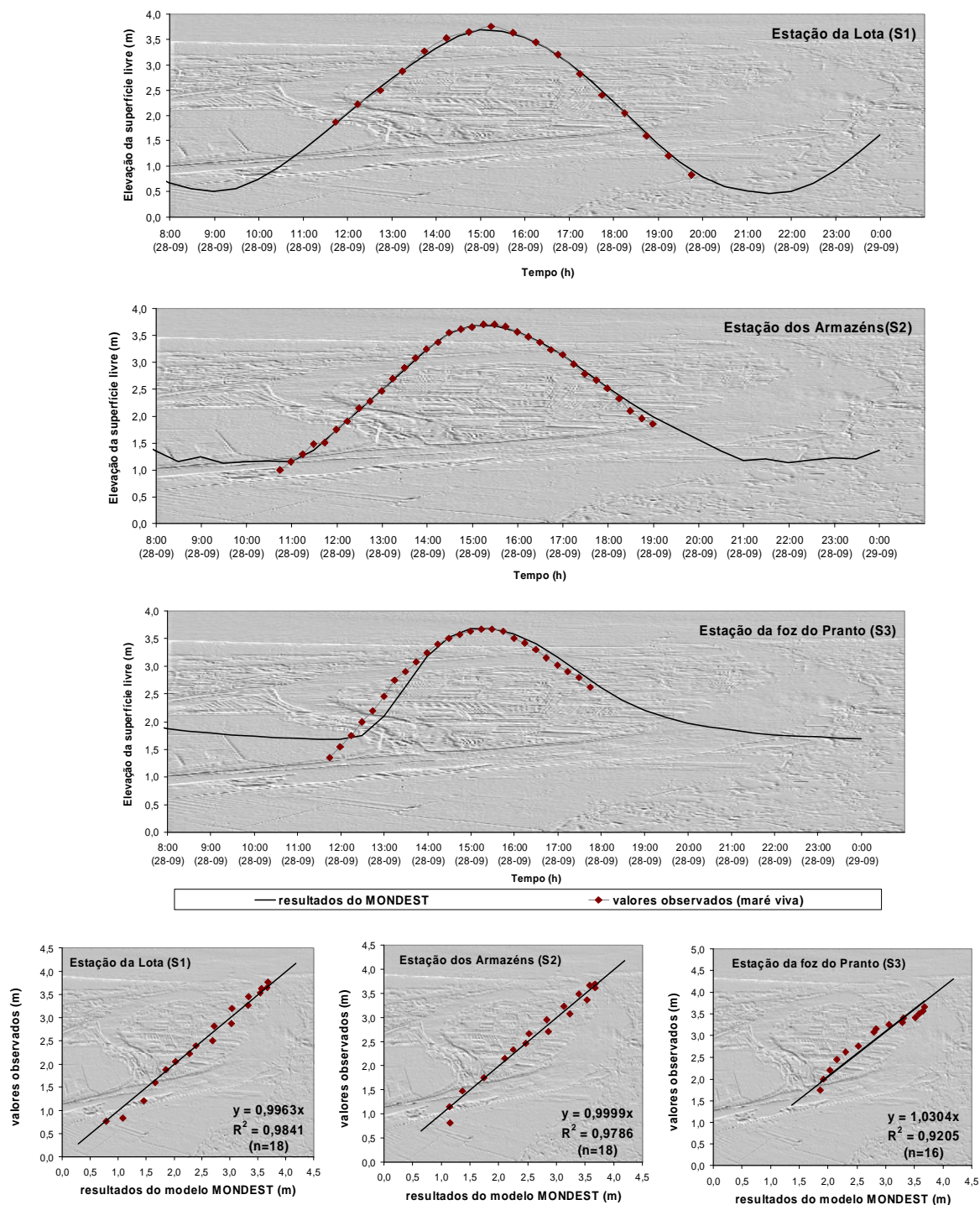


Figura 6 Calibração do modelo *MONDEST* relativa ao nível da superfície livre (NSL)

A calibração do modelo foi também efectuada na fronteira montante do estuário, junto à ponte de Formoselha, considerando a propagação duma maré viva de elevada amplitude (cerca de 1,9 m) ocorrida em Setembro de 2002, apresentando-se os resultados na Figura 7.

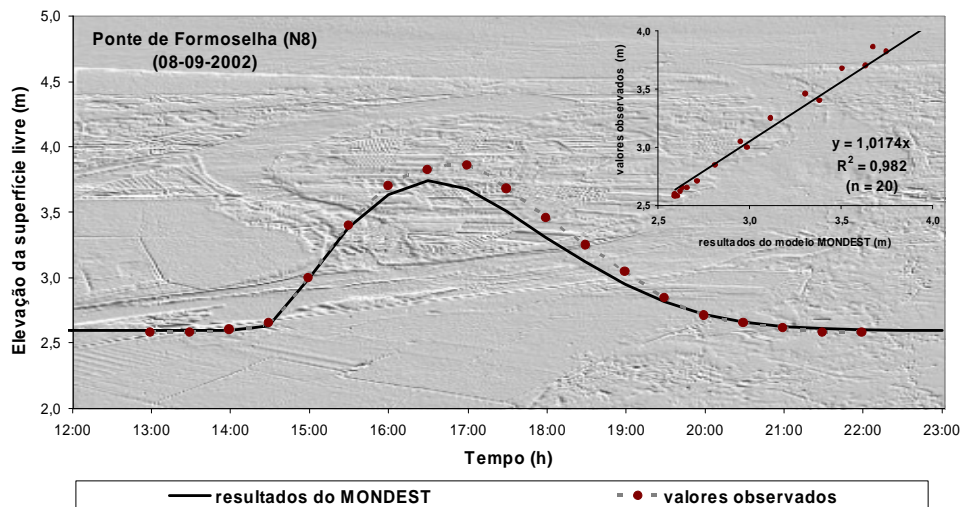


Figura 7 Calibração na fronteira montante do estuário (Ponte de Formoselha)

Verifica-se que nas regiões mais interiores do braço sul (como na foz do rio Pranto) há uma maior influência da batimetria, originando maior assimetria na duração da enchente e da vazante. De acordo com os resultados da análise de sensibilidade efectuada, o desfaseamento entre os valores observados e calculados poderia ser minimizado com a adopção, neste subdomínio, dum valor do coeficiente de Manning próximo de $0,04 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$. A adopção criteriosa de mais do que um valor do coeficiente de rugosidade para o domínio modelado poderá ser um futuro refinamento deste modelo, de modo a reproduzir melhor a heterogeneidade do leito deste estuário, acentuada pela sua regularização parcial efectuada na década de 80 e agravada pelos processos de assoreamento induzidos, em algumas zonas, por essa intervenção.

Com os mesmos valores dos parâmetros de calibração, procedeu-se à validação da componente hidrodinâmica do modelo MONDEST através da comparação dos resultados do modelo com outras séries de dados, obtidas em diferentes regimes de maré (média e quebrada), tendo-se igualmente verificado um boa aproximação dos resultados do modelo MONDEST aos registos das campanhas de amostragem (Figura 8).

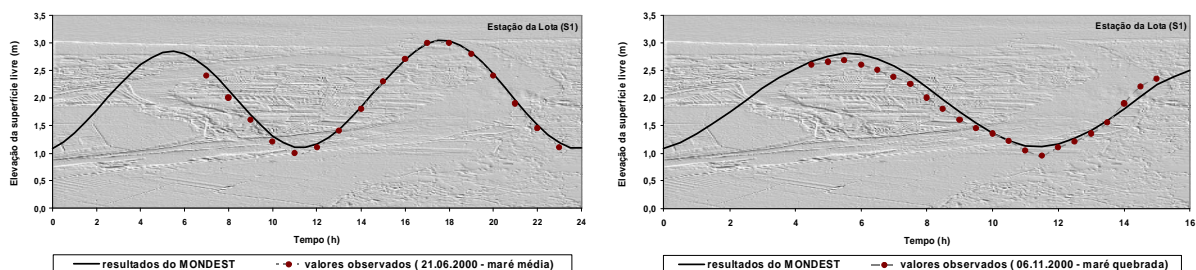


Figura 8 Validação do modelo *MONDEST* relativa ao nível da superfície livre (NSL)

A análise dos resultados dos cenários de simulação H3 e H4 permite constatar que nas zonas interiores dos dois braços em *Cinco Irmãos* (N4) e na Foz do pranto (S3) há uma assimetria acentuada nessas durações, com um tempo de enchente de 5 horas e um tempo de vazante de 7,5 horas, para um caudal do rio Mondego de $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Figura 9)

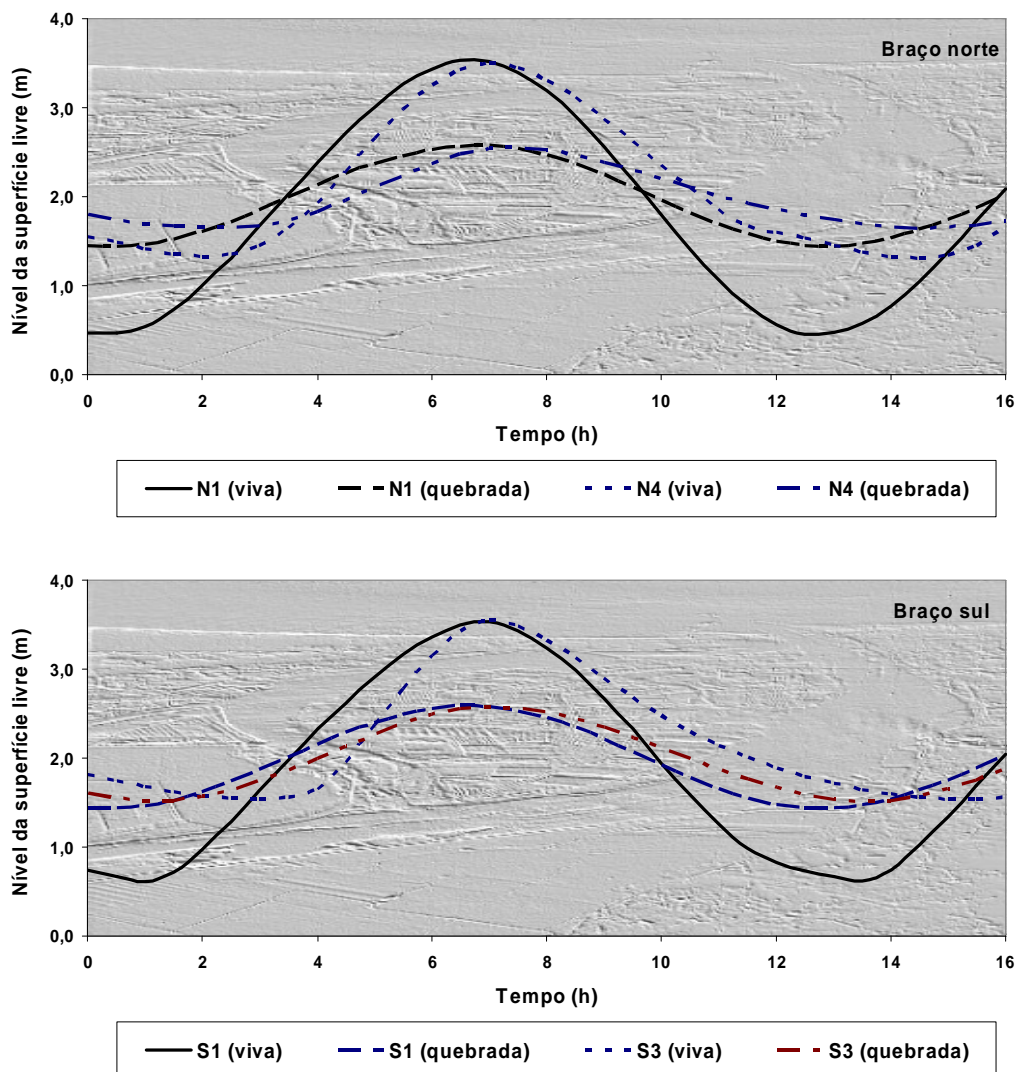


Figura 9 Efeito do regime de maré na variação do NSL nas zonas interiores do estuário

As secções dos dois braços a distâncias semelhantes da embocadura apresentam NSL semelhantes entre si para qualquer regime de maré, embora as do braço sul apresentem uma tendência para um maior prolongamento das vazantes, devido às suas menores profundidades. No braço norte verificam-se atrasos, entre as secções N1 e N4, de 15 minutos e de 2 horas na ocorrência da preia-mar e da baixa-mar, respectivamente.

No cálculo dos prismas de maré considerou-se os efeitos quer da variação do regime de maré para um caudal do rio Mondego $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Figura 10), quer da variação do caudal do rio Mondego para uma maré viva. Esse cálculo incidiu não só sobre a totalidade do estuário (até aos molhes interiores do porto comercial da Figueira da Foz), mas também sobre os seguintes subdomínios: zona estuarina (até à estação N4), braço sul a montante da foz do Pranto, trecho do rio Pranto a jusante das comportas, trecho do braço sul a montante da Ponte da Gala e braço sul (a totalidade até à confluência dos dois braços (N1).

Como era previsível, verifica-se que o regime de maré tem uma grande influência no valor do prisma de maré, originando neste estuário e no seu braço sul uma redução dos prismas de vazante de 56% e 61%, respectivamente.

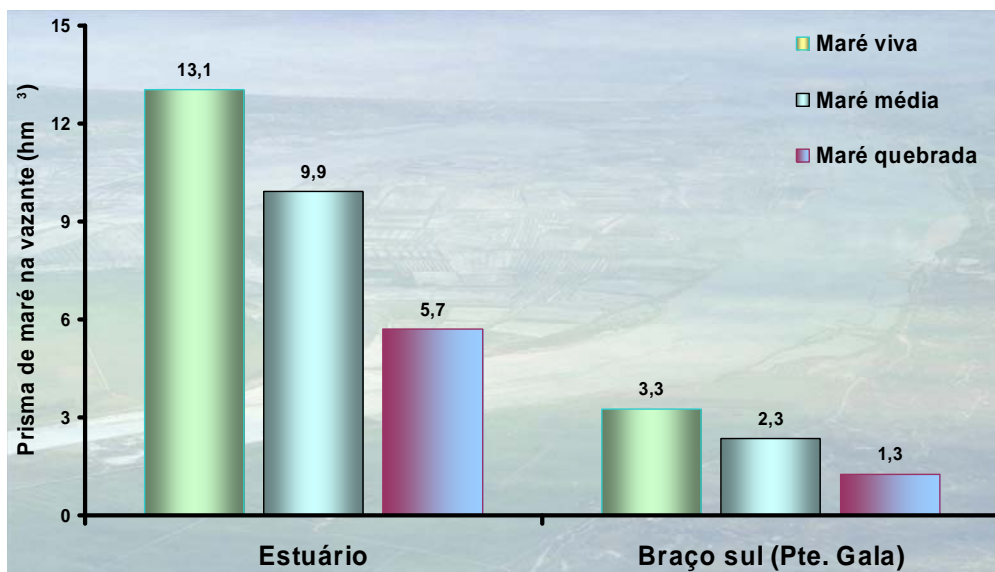


Figura 10 Variação do prisma de maré na vazante em função do regime de maré

Os cálculos efectuados permitiram identificar assimetrias entre os prismas de maré ocorridos na enchente e na vazante. Nas marés vivas e médias o prisma na vazante excede em cerca de 9% o da enchente, enquanto nas marés quebradas é o da enchente que excede o da vazante em 2%. No braço sul o padrão da assimetria mantém-se, mas as diferenças não excedem os 0,3%, sendo por isso irrelevante. No caso da maré viva, regista-se um atraso na ocorrência dos volumes mínimos de 30 minutos, no braço sul, e de 2 horas, no trecho do rio Pranto, em relação à mesma situação considerando a totalidade do estuário.

Com o objectivo de quantificar a distribuição espacial do prisma médio de maré em cada um dos braços do estuário (incluindo no braço norte a zona fluvial), considerando o caudal de estiagem do rio Mondego, procedeu-se à quantificação das parcelas correspondentes a vários trechos do estuário. Em termos relativos, a variação espacial do prisma de maré é muito semelhante nos dois braços do estuário, evidenciando, por isso, um certo equilíbrio dos efeitos das respectivas características geométricas e batimétricas. Na zona fluvial do estuário (a montante de N4) há uma suavização do decréscimo do prisma de maré com a distância à embocadura do estuário.

Para caudais de estiagem, o prisma médio de maré no braço norte (a montante de N1), no braço sul (a montante da confluência dos dois braços) e na zona fluvial do estuário (a montante de N4) pode ser calculado através das Eq. 1, 2 e 3, respectivamente:

$$P_m = 0,72 \times d + 6,753 \quad (1)$$

$$P_m = 0,667 \times d + 3,077 \quad (2)$$

$$P_m = 0,223 \times d + 2,345 \quad (3)$$

em que,

P_m - é o prisma médio de maré (hm^3), para caudais de estiagem do rio Mondego;
 d - é a distância (km) da secção à confluência dos dois braços (N1).

Além da determinação dos respectivos volumes máximos e mínimos de água no estuário, através dos resultados do modelo MONDEST, procedeu-se também à quantificação dos respectivos tempos de duração da enchente e da vazante, de modo a permitir a quantificação de caudais médios de maré.

Os cálculos efectuados para determinar os caudais médios de maré à entrada do estuário (secção dos molhes interiores) e na Ponte da Gala foram sintetizados no Quadro 2 e correspondem aos mesmos cenários adoptados na estimativa dos prismas de maré.

Quadro 2 Prismas e caudais médios de maré na embocadura do estuário e na Ponte da Gala

Local	Cenário	Prisma de maré (hm ³)		Duração (h)		Caudal médio de maré (m ³ .s ⁻¹)	
		enchente	vazante	enchente	vazante	enchente	vazante
Estuário	H 1	9,178	9,894	6,25	6,25	408	440
	H 2	12,020	13,063	6,25	6,25	534	581
	H 3	5,818	5,692	6,25	6,25	259	253
	H 7	14,792	15,386	6,25	6,25	657	684
	H 10	11,387	12,089	6,00	6,50	527	517
	H 15	10,528	10,609	6,00	6,50	487	453
Ponte da Gala	H 1	2,334	2,341	5,50	7,00	118	93
	H 2	3,265	3,276	5,50	7,00	165	130
	H 3	1,269	1,266	6,00	6,50	59	54
	H 7	3,449	3,450	5,50	7,00	174	137
	H 10	3,325	3,337	5,50	7,00	168	132
	H 15	2,981	3,135	5,25	7,25	158	120

Em termos globais, verifica-se que à entrada do estuário os caudais médios de maré na vazante são superiores, em cerca de 10%, aos da enchente, enquanto na secção da Ponte da Gala os caudais médios da maré na enchente são superiores, atendendo à assimetria das respectivas durações.

Nestes cálculos não foram considerados os cenários que traduzem as descargas do rio Pranto e que podem influenciar não só pelo acréscimo de volume de água a escoar durante a vazante, mas também pelo eventual efeito de redução dos defasamentos entre as durações da enchente e da vazante, que, como vimos, são significativos no braço sul do estuário.

Conclui-se, destes resultados, que a variação relativa dos caudais médios de maré é muito semelhante nos dois braços do estuário, facto já verificado com a evolução espacial dos prismas de maré.

4 – CONCLUSÕES

As simulações efectuadas pelo modelo *MONDEST* permitiram avaliar a variação das assimetrias entre a duração da enchente e da vazante, o defasamento temporal da propagação da maré em cada braço, a não inversão do sentido de escoamento no braço norte para caudais de cheia, o efeito directo das correntes do braço norte na circulação do braço sul e o cálculo de caudais e prismas de maré.

Nas zonas mais interiores dos dois braços há uma acentuada assimetria na duração da enchente e da vazante, verificando-se um tempo de enchente de 5 horas e um tempo de vazante de 7,5 horas, para uma maré média e um caudal de estiagem do rio Mondego. Devido ao efeito da batimetria nas secções da zona fluvial do estuário, a duração da vazante é prolongada, podendo atingir quase 10 horas, o que origina um atraso no início da enchente de 4,5 horas.

Para caudais de cheia do rio Mondego, a duração da enchente fica reduzida a apenas 3,5 horas, deixando o escoamento no braço norte de ser reversível, ao contrário do que ocorre no braço sul, onde a reversibilidade se mantém sempre. O efeito do caudal do rio Mondego na hidrodinâmica do braço sul pode ser motivado pela entrada directa por jusante, principalmente durante a enchente, das correntes do braço norte para o braço sul, para caudais de cheia do rio Mondego superiores a 500 m³.s⁻¹.

A variação dos prismas de maré não cresce proporcionalmente com o valor do caudal do rio Mondego. A linha de tendência, associada aos valores obtidos para o estuário, indica que o prisma máximo, para marés vivas, ocorre para valores do caudal próximos de 60 m³.s⁻¹. No braço sul, a assimetria entre os prismas de maré na enchente e na vazante varia na razão inversa do caudal do rio Mondego.

O efeito dos caudais de cheia traduz-se numa redução, de 20% para 10%, da contribuição relativa do prisma de maré da zona fluvial. A variação dos caudais médios de maré e a evolução espacial dos prismas de maré são muito semelhantes nos dois braços do estuário.

Sendo o caudal fluvial do rio Pranto artificialmente controlado por comportas, os resultados obtidos neste estudo poderão dar um contributo importante na optimização dos procedimentos operacionais destas estruturas hidráulicas, de modo a mitigar o impacto negativo da descarga excessiva de nutrientes neste meio hídrico receptor e a promover uma abordagem integrada na resolução de problemas latentes em ambientes estuarinos vulneráveis a processos de eutrofização.

BIBLIOGRAFIA

- DETTMANN, E. – “Effect of water residence time on annual export and denitrification of nutrient in estuaries: a model analysis”. *Estuaries*, 24, 4, 2001, 481–490.
- DUARTE, A.A.L.S. - *Hydrodynamics influence on estuarine eutrophication processes*. PhD. Thesis, University of Minho, Braga, Portugal (in Portuguese), 2005.
- DUARTE, A.A.L.S.; PINHO, J.L.S.; PARDAL, M.A.; NETO, J.M.; VIEIRA, J.M.P.; 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.; VIEIRA, J.M.P. - “Effect of Nutrient Loading Characteristics on Estuarine Residence Time. A Case Study”. In *Proceedings of 11th International Conference on Diffuse Pollution (DPUD'2007)*. Belo Horizonte, Brasil, Setembro 2007 (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 (CD-Rom)*, Vienna, Ostrich, Setembro 2008.
- DUARTE, A.A.L.S.; VIEIRA, J.M.P. – “Mitigation of estuarine eutrophication processes by controlling freshwater inflows”. *WIT Transactions on Ecology & the Environment*, 124, 2009, pp. 339-350.
- OLIVEIRA, A.A.; BAPTISTA, A.M. - “Diagnostic modeling of residence times in estuaries”. *Water Resources Research*, 33, 1997, pp. 1935-1946.
- NETO, J.M. - *Nutrient enrichment in a temperate macro-tidal system. Scenario analysis and contribution to coastal management*. PhD Thesis, University of Coimbra, Portugal, 2004.
- PARDAL, M.A. - *Eutrophication impact on macrobenthic communities of Mondego estuary south arm (Portugal)*. PhD. Thesis, University of Coimbra, Portugal (in Portuguese), 1998.
- VIEIRA, J.M.P. – “Decision Support Systems for Water Resources Planning and Management”. In *VII International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science* (Edited by Bento, J., Oliveira E.A, Pereira E.), Elsevier Science Ltd, Oxford, UK, 2, 1999, p.p. 1197-1206.
- WANG, C.F.; HSU, M.; KUO, A.Y- “Residence time of the Danshuei river estuary”. *Estuarine, Coastal & Shelf Science*, 60, 2004, pp.381-393.
- 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*. US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory, Vicksburg, USA, 2000.