

Monitorização da Hidrodinâmica e da Qualidade da Água no Estuário do Rio Mondego

António A. L. S. Duarte¹, José M.P. Vieira²

Universidade do Minho, Dep. de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal

João M. Neto³, Miguel A. Pardal⁴

Universidade de Coimbra, IMAR, Dep. de Zoologia Coimbra Portugal

RESUMO

A hidrodinâmica dos sistemas estuarinos favorece a retenção de nutrientes, sustentando uma actividade biológica intensa, facto que potencia o desenvolvimento das comunidades ribeirinhas e intensifica o stress ambiental sobre estes ecossistemas aquáticos. No caso do estuário do rio Mondego, além das actividades portuária, balnear, industrial e de exploração de recursos marinhos, a orizicultura surge como a actividade agrícola intensiva mais relevante do Baixo Mondego, originando uma entrada significativa e não controlada de nutrientes e pesticidas nas águas estuarinas, por lixiviação dos terrenos agrícolas adjacentes.

Neste trabalho apresentam-se os resultados da monitorização efectuada no braço sul do estuário do Mondego, para se obter um conhecimento mais sustentado sobre os potenciais factores determinantes da vulnerabilidade à eutrofização deste sistema estuarino, (dinâmica de nutrientes, biomassa algal, insolação, precipitação, salinidade e condições hidrodinâmicas), de modo a definir as práticas de gestão mais adequadas ao controlo da qualidade da água no braço sul deste estuário. As conclusões deste trabalho permitiram sustentar importantes medidas de gestão para reverter o processo de eutrofização observado, tais como a alteração do local de descarga dos caudais do rio Pranto e a diminuição dos tempos de residência no braço sul, através da reabertura do canal na sua zona montante.

1. INTRODUÇÃO

A qualidade de vida e o sustento dessas populações depende, decisivamente, da conservação das condições naturais dos ecossistemas aquáticos e da mitigação dos impactos negativos gerados pela utilização dos meios hídricos como receptor de descargas pontuais (industriais e domésticas) e difusas (agricultura e aquicultura), responsáveis pela progressiva eutrofização dos sistemas fluviais e estuarinos e consequente alteração da sua estrutura trófica.

¹ Doutor em Eng. Civil, Professor Auxiliar

² Doutor em Eng. Civil, Professor Catedrático

³ Doutor em Biologia, Professor Auxiliar

⁴ Doutor em Biologia, Professor Associado, com Agregação

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 realização de várias campanhas de amostragem no estuário do rio Mondego durante as duas últimas décadas. O facto de as florescências algais observadas não terem ocorrido em anos de maior pluviosidade, geradora de elevados caudais fluviais e de períodos mais prolongados de baixas salinidades, veio acentuar a relevância do estudo da influência da hidrodinâmica estuarina nos processos de eutrofização, nomeadamente através do conhecimento dos tempos de residência de nutrientes limitantes e da velocidade de arrastamento de macroalgas infestantes (Duarte e Vieira, 2004).

Neste trabalho faz-se uma caracterização do regime fluvial dos rios Mondego e Pranto e do regime de marés neste estuário, apresentam-se os principais resultados das campanhas de monitorização (efectuadas no período 2000-2001), bem como a análise dos valores observados das principais variáveis de estado e da sua relevância para o estudo da dinâmica de nutrientes e do correspondente estado trófico das águas estuarinas. A ordem de grandeza dos valores da velocidade média observados nos locais de amostragem, não pode ser generalizada aos restantes trechos do braço sul, face às enormes variações das respectivas secções molhadas durante o ciclo de maré, tornando necessária uma abordagem multidimensional e dinâmica, que nenhuma campanha de amostragem, por mais extensa que fosse, poderia efectuar. Porém, estas campanhas são imprescindíveis para se obter informação sobre o comportamento real do estuário, que é crucial para a calibração e validação de modelos matemáticos deste complexo sistema hídrico (Duarte, 1997; Chapra, 1997).

Saliente-se que algumas das conclusões apresentadas neste trabalho serviram de suporte à decisão de implementar várias medidas de gestão, no sentido de reduzir as cargas de nutrientes no braço sul e o tempo permanência de nutrientes no sistema, tais como a alteração do local de descarga dos caudais do rio Pranto e a melhoria das condições hidrodinâmicas no braço sul através da reabertura do canal na sua zona de montante.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A zona estuarina propriamente dita (isto é, sujeita a intrusão salina) localiza-se no concelho da Figueira da Foz, apresenta uma área de aproximadamente 1200 ha com um elevado interesse ecológico, devido à sua biodiversidade. Nessa área, situa-se a bifurcação dos seus braços (norte e sul), separados pela ilha da Murraceira, a cerca de 7,4 km da foz, que vão confluir 1,3 km a montante da embocadura do estuário (Figura 1). Estes dois braços apresentam características hidrográficas muito diferentes e uma geomorfologia em permanente mutação, devida à acção contínua da maré e, sazonalmente, aos elevados caudais de cheia do rio Mondego.

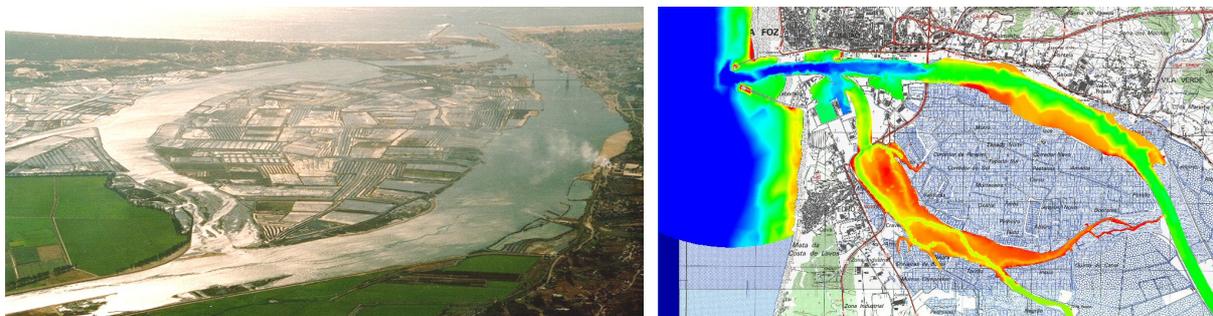


Figura 1 – Vista aérea e batimetria (preia-mar) da zona estuarina do rio Mondego

O braço norte é mais profundo que o sul (4 a 8 metros *versus* 2 a 3 m, em preia-mar) e recebe o caudal fluvial do rio Mondego, que é controlado pela Açude-Ponte de Coimbra e pelas afluições dos rios Ega, Arunca e Foja, sendo a sua batimetria variável junto à embocadura do estuário, face à frequência da execução de dragagens no canal de navegação dos portos comercial e de pesca, ficando mais homogénea na zona a montante da ponte da Figueira da Foz. A batimetria do braço sul apresenta extensas áreas intermareais (sapais), devido à emersão extensos bancos de areia na sua zona central durante a baixa-mar, originando a formação de canais de circulação estreitos e pouco profundos. A partir dos anos 80, houve um progressivo assoreamento na seu trecho de montante, junto à zona dos *Cinco Irmãos* (Figura 2), pelo que o principal escoamento fluvial afluyente provém do rio Pranto, facto que acelerou o processo de eutrofização observado neste braço do estuário.



Figura 2 – Assoreamento no trecho montante do braço sul do estuário do Mondego

Na Figura 3 indicam-se os locais de amostragem seleccionados para monitorização dos parâmetros de qualidade, quer na coluna de água Lota (LT), esteiro dos Armazéns (EA) e foz do rio Pranto (FP), quer nos sedimentos, correspondente às zonas (A, B e C) onde se identificou um gradiente de eutrofização, relacionado com o progressivo declínio dos prados *de Zostera noltii* nas últimas décadas e a ocorrência (episódica) de florescências macroalgais de espécies infestantes (*Enteromorpha sp.* e *Ulva sp.*) numa área significativa dos sapais (Pardal, 1998; Neto, 2004).

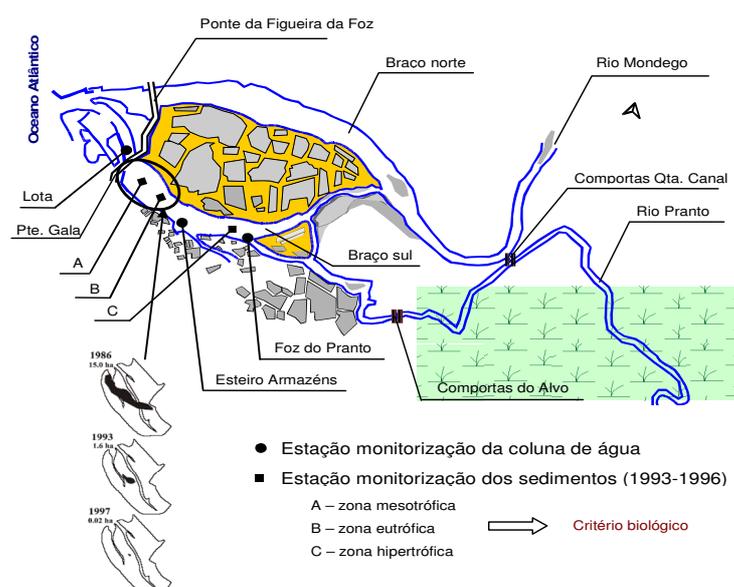


Figura 3 – Localização das estações de amostragem no braço sul do estuário do Mondego

3. HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO

Os regimes hidrodinâmicos dos dois braços do estuário são completamente distintos. Enquanto que a hidrodinâmica do braço norte é influenciada pela acção conjunta do caudal fluvial e da maré, a circulação no braço sul é fundamentalmente condicionada pelo regime de marés, apresentando um comportamento muito semelhante ao de uma lagoa costeira (Martins *et al.*, 2001). Tratando-se de um braço estuarino pouco profundo, a hidrodinâmica do braço sul é fortemente influenciada pela batimetria, acção da maré e pelo escoamento (sazonal e intermitente¹) do rio Pranto, determinando condições de mistura e transporte que afectam as interações associadas aos processos biogeoquímicos, as comunidades algais e a distribuição dos nutrientes presentes neste ecossistema.

A diferença de profundidade entre os dois braços determina uma propagação mais rápida da maré no braço norte, provocando aí variações (diárias) de salinidade mais acentuadas (Almeida e Seabra-Santos, 1993). Segundo Cunha e Dinis (2001), a propagação da maré faz-se sentir até à zona de Montemor-o-Velho (24 km para montante da embocadura), no caso caudais fluviais de estiagem e em maré viva. No sentido de validar esta conclusão, procedeu-se à monitorização da elevação da superfície livre imediatamente a jusante da Ponte de Formoselha (4,5 km a montante da Ponte de Montemor), durante uma maré viva e em situação de estiagem, tendo registado uma amplitude da altura de água de 1,25 m (Figura 4). A propagação da maré para montante, no mínimo até à ponte de Pereira, só é impedida pela estrutura de retenção construída a montante daquela ponte.



Figura 4 – Ponte de Formoselha: elevação da superfície livre por efeito da maré.

Na Figura 5, apresenta-se um exemplo da variação originada pelos diferentes regimes médios de maré (viva, quebrada e média) na magnitude da velocidade superficial observada, na estação da Lota, durante as campanhas de amostragem (2000-2001). Verifica-se que existe uma duplicação da velocidade máxima entre a situação de maré viva e a de maré quebrada.

A descarga dos caudais do rio Pranto é controlada por estruturas de retenção, dotadas de comportas, localizadas em duas secções distintas: uma, no lugar do Alvo (3,3 km a montante da foz do rio Pranto); e outra, no lugar de Maria da Mata, que permite efectuar essa descarga na margem esquerda do rio Mondego (2,5 km a montante dos *Cinco Irmãos*). O caudal horário de ponta descarregado pelas comportas do Alvo atinge os $35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

¹ A abertura das comportas é efectuada entre a meia-vazante e a meia-enchente, apenas quando ocorre pluviosidade intensa ou por necessidade dos orizicultores. Esse controlo visa assegurar a retenção dos volumes de água necessários à orizicultura e impedir a intrusão de água salina nos terrenos agrícolas .

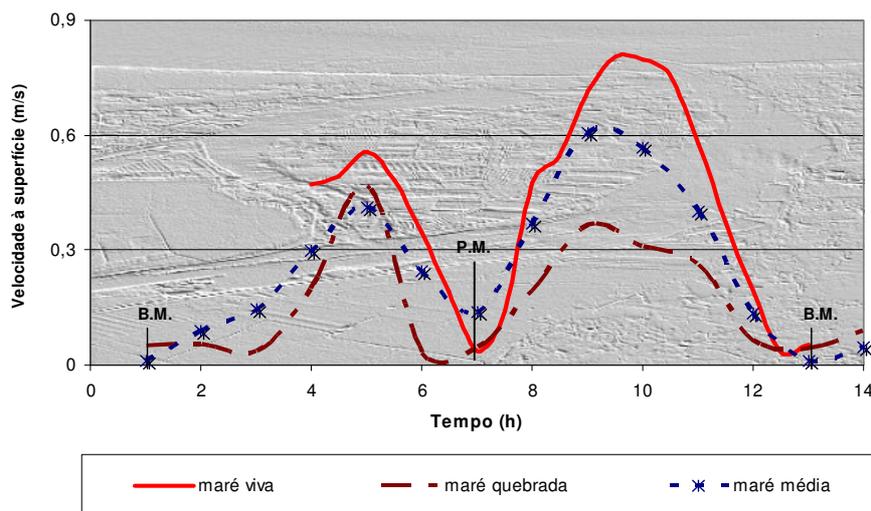


Figura 5 – Variação da magnitude da velocidade com o regime de maré (estação da Lota).

Os caudais de cheia do rio Mondego foram suavizados (10 a 20%) após a construção de vários aproveitamentos hidroeléctricos a montante de Coimbra. Na Tabela 1, apresentam-se os caudais estimados para a estação hidrométrica de Coimbra, no período 1990-2004 (DGRAH, 1987).

Tabela 1 – Caudais (estimados) do rio Mondego na estação hidrológica de Coimbra

Dias / ano	Ano médio	Ano húmido	Ano seco
10	500	700	160
50	175	360	58
100	85	240	30
200	18	40	5
Caudal médio anual:	75	145	27
Caudal dominante ¹ :	340	440	150

¹ caudal *equivalente*, que permanecendo constante durante um ano, transportaria o mesmo volume de material sólido que o transportado pelos caudais que se verificam nesse período de tempo.

Na embocadura do estuário, os caudais de cheia, para períodos de retorno superiores a 50 anos, podem atingir valores superiores ao dobro dos estimados na Tabela anterior. Na Figura 6, apresenta-se uma distribuição dos valores mensais (médios, máximos e mínimos) dos caudais descarregados na Açude-Ponte de Coimbra e a respectiva curva de caudais médios classificados afluentes ao estuário, no período referido (Duarte, 2005).

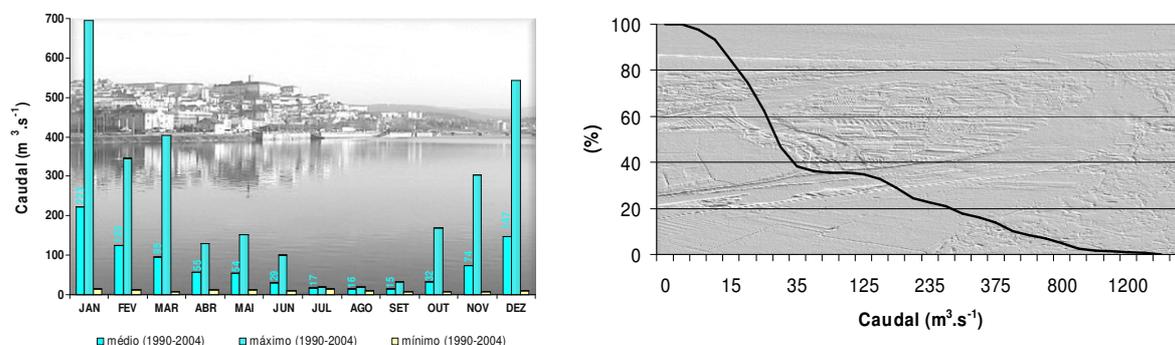


Figura 6 – Caudais médios mensais descarregados Coimbra e curva de caudais classificados.

As entradas de caudal fluvial no estuário do rio Mondego conferem-lhe uma grande capacidade de exportação de nutrientes através do transporte massa macroalgal, a qual que incorpora uma fracção elevada da massa total de nutrientes presente nos sistemas estuarinos. De acordo com os resultados obtidos para o braço sul do estuário do Mondego na campanha de 2000-2001, essa fracção pode atingir 42%, no caso do azoto, e 32%, no caso do fósforo (Duarte *et al.*, 2001).

4. RESULTADOS DA MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

A natureza dos parâmetros (bióticos e abióticos) seleccionados para a monitorização da qualidade da água no braço sul do estuário do Mondego esteve intimamente associada aos objectivos iniciais do estudo e que motivaram a realização das campanhas de amostragem: obter um diagnóstico da situação face à alta produtividade do sistema; estimar as descargas de nutrientes no braço sul; perceber os mecanismos que regulam o processo de eutrofização; e avaliar o impacto da redução das descargas de nutrientes, essencial para a definição de soluções de gestão apropriadas.

As campanhas de amostragem de 2000-2001 foram efectuadas ao longo de ciclos de maré com diferentes amplitudes e para valores distintos do caudal fluvial, tendo-se efectuado medições *in situ* da profundidade, velocidade, salinidade, temperatura, *pH* e OD. Além disso, procedeu-se à recolha periódica (10 a 15 minutos) de amostras para medição, em laboratório, das concentrações de azoto inorgânico, fósforo inorgânico, silício e *clorofila-a*. Apresenta-se, neste ponto, uma síntese da análise dos resultados obtidos nestas campanhas de amostragem, relativos aos parâmetros de qualidade mais significativos para o estudos dos processos de eutrofização.

4.1. Salinidade

O braço sul apresenta-se quase sempre bem misturado, excepto para situações de caudais de cheia no rio Pranto em que se apresenta parcialmente misturado. Nas situações de caudal frequente no rio Mondego, a salinidade é alta durante o ciclo de maré, variando entre 15 e 34‰ na foz do Pranto. Na Figura 8 apresentam-se os valores médios da salinidade obtidos na campanha de 2000-01, nas estações Lota e FP, bem como o seu intervalo de variação durante um ciclo de maré.

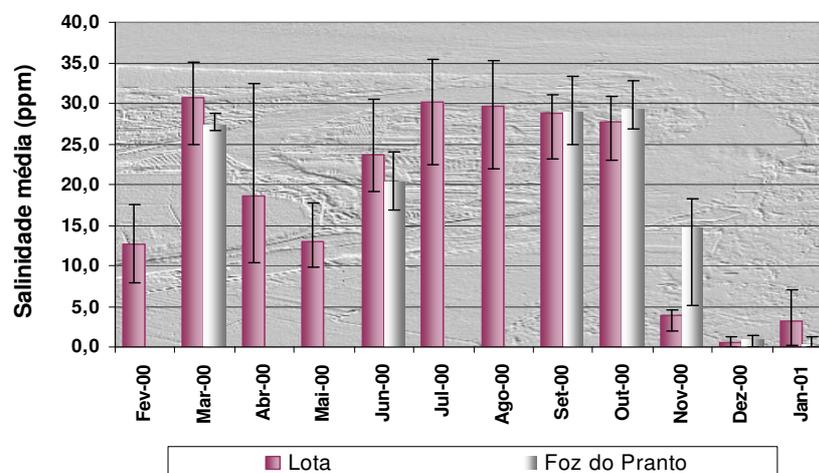


Figura 7 – Salinidade média observada no braço sul do estuário do Mondego (2000-2001).

Para caudais de cheia do rio Mondego elevados e persistentes (como em Janeiro de 2001, atingindo os $1815 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), observaram-se salinidades nulas na foz do Pranto, mesmo em preia-mar, facto que veio confirmar a necessidade duma análise integrada de todo o sistema estuarino de modo a avaliar o efeito do escoamento fluvial do braço norte na hidrodinâmica do braço sul (Duarte *et al.*, 2002).

4.2. Oxigénio dissolvido

Os valores do oxigénio dissolvido no braço sul não apresentaram em nenhuma campanha uma nítida sazonalidade, sendo apenas de realçar uma diminuição dos seus valores no Verão, após um habitual incremento observado durante a Primavera (Figura 8).

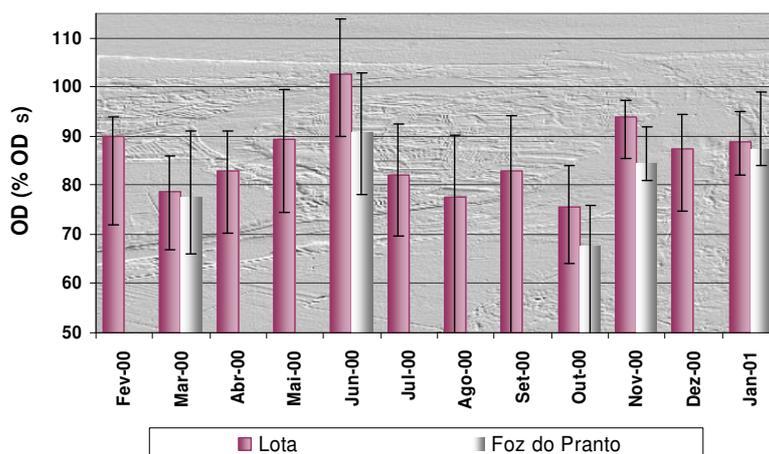


Figura 8 – Valores médios de OD observados no braço sul do estuário (2000-2001).

A variação diária não está relacionada com o ciclo de maré, mas sim com a actividade de fotossíntese, com os valores mais elevados a ocorrerem a meio e no final da tarde e os menores no período nocturno, apresentando no Verão amplitudes muito significativas.

4.3. Azoto

O ritmo de abertura das comportas do rio Pranto influencia fortemente as concentrações de azoto e de sílica no braço sul do estuário, coincidindo os seus valores mais elevados com o início dessa abertura. Na Figura 9 apresenta-se uma síntese dos resultados da monitorização das concentrações de azoto inorgânico dissolvido na estação da Lota (2000-01).

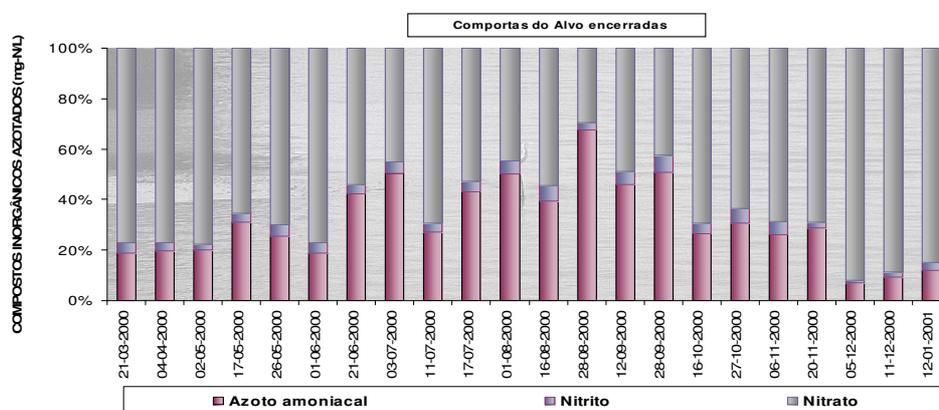


Figura 9 – Concentração da fracção dissolvida de azoto na estação da Lota (2000-2001)

A massa de azoto dissolvida foi posteriormente adicionada à massa de azoto transportada em suspensão ou incorporada na vegetação flutuante, de modo a permitir uma avaliação mais rigorosa do balanço anual de nutrientes neste braço.

4.4. Fósforo

As elevadas concentrações de fosfatos observadas nos sistemas estuarinos durante a Primavera e o Verão (ocorrência de temperaturas mais elevadas) provêm da libertação de dos sedimentos para a coluna de água e dependem quase sempre da grande quantidade de matéria orgânica acumulada na camada bêntica e que funciona como meio redutor (Valiela, 1995). Tal facto é confirmado, neste braço estuarino, pela diminuição, já observada durante a campanha de 1993-94 (Figura 10), dos valores da concentração de fosfatos no sedimento, durante a Primavera e no Verão.

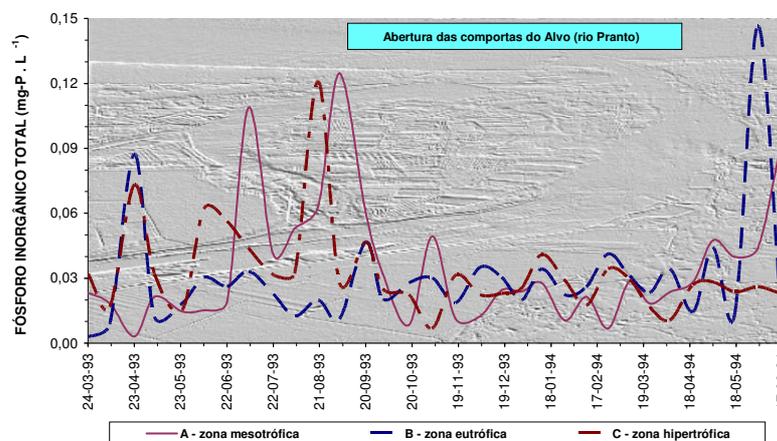


Figura 10 – Variação mensal de fosfato nos sedimentos do braço sul do estuário (1993-94)

A diminuição dos fosfatos na coluna de água nos meses mais frios e pluviosos (que obrigam à abertura das comportas do Alvo), origina, por sua vez, um aumento substancial da *razão de Redfield* (N:P), que se traduziu, nessas campanhas, numa variação dessa razão de 8 para valores superiores a 100, cerca de um mês após a abertura das comportas.

A evolução mensal dos valores de fósforo inorgânico dissolvidos na coluna de água, bem como a variação da razão *N:P* verificadas na estação da Lota, durante a campanha de 2000-01, encontra-se sintetizada na Figura 11.

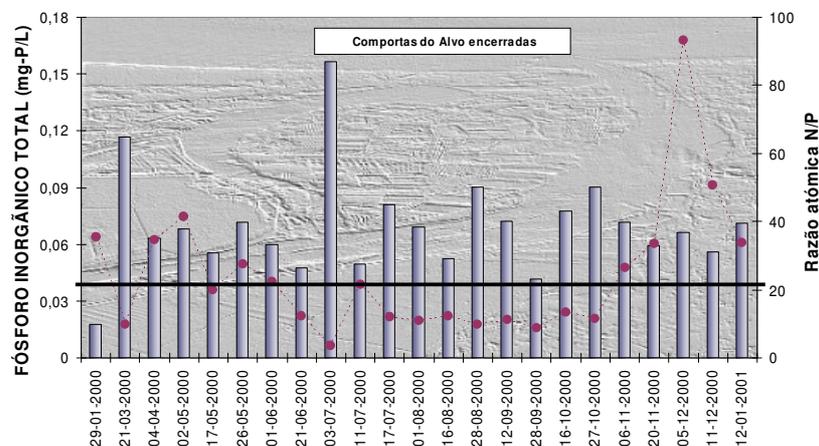


Figura 11 – Fósforo inorgânico dissolvido e razão de *Redfield* (N:P) na estação LT (2000-01)

A comparação (possível) entre os valores da concentração de nutrientes obtidos nestas duas campanhas permite confirmar, pela sua consonância, um comportamento característico do braço sul em termos de nutriente limitante da produção primária: o fósforo, durante os períodos frios (Outono e Inverno), e o azoto nos períodos mais quentes (Primavera e Verão), desde que haja um efluxo de fósforo a partir dos sedimentos potenciado pelo aumento da temperatura e da hipoxia.

Dado que é no período mais quente que os outros factores abióticos limitantes (luz solar, salinidade, tempo de residência) são mais favoráveis à ocorrência de florescências macroalgais, pode-se afirmar que o azoto é o principal nutriente limitante no braço sul do estuário do Mondego

A comparação dos resultados das duas campanhas permite ainda constatar a redução considerável (cerca de 30%) na carga de azoto inorgânico dissolvido descarregada no braço sul (devido às medidas de gestão adoptadas desde 1998) e a uma pequena atenuação das entradas de fósforo no braço sul. Esta diferença pode ser explicada com base nos dados da campanha de 2000-01, que registam entradas de azoto essencialmente na forma inorgânica dissolvida (83%), enquanto a principal entrada de fósforo (52%) ocorre numa forma adsorvida pelas partículas em suspensão (Neto, 2004). Este facto originou uma diminuição substancial nos valores máximos da razão de *Redfield*, que só episodicamente ultrapassou o valor 40.

4.5. Clorofila-a

Os valores deste pigmento observados nas áreas mais interiores do braço sul do estuário foram sempre menores do que nas estações de jusante, indiciando que, estando as comportas do Alvo encerradas, o fitoplâncton presente no braço é de origem marinha.

As duas campanhas de amostragem permitiram constatar que após a abertura das comportas do rio Pranto, houve um novo aumento nos valores de *clorofila-a*, especialmente nas estações de montante, presumindo-se que, neste caso, esse fitoplâncton tenha uma origem dulçaquícola, sendo transportado pelo rio Pranto.

As concentrações de clorofila-a apresentaram, na campanha de 2000-01, uma variação diurna muito acentuada, atingindo-se os valores máximos a meio e final da tarde e os mínimos durante o período nocturno, como seria de prever num pigmento resultante da actividade fotossintética.

Ao contrário do habitual em lagos e albufeiras, não se verificou neste sistema estuarino qualquer correlação entre as concentrações de fósforo inorgânico total e de *clorofila-a*.

5. CONCLUSÕES

No seu conjunto, os resultados obtidos ao longo das várias campanhas efectuadas nas últimas décadas, no braço sul do estuário, indicam que as concentrações de nutrientes são influenciadas pela mistura das águas estuarinas com as massas hídricas adjacentes (fluvial e marinha) e pela dinâmica ao nível da fronteira sedimento-água. Neste sistema, os sedimentos actuam como uma fonte interna de nutrientes, podendo retê-los quando se encontram em excesso na coluna de água.

A consonância dos resultados de várias campanhas de monitorização evidencia um comportamento característico do braço sul deste estuário quanto ao nutriente limitante da produção primária: o fósforo, durante os períodos frios e o azoto nos períodos mais quentes, desde que haja um retorno do fósforo retido nos sedimentos à coluna de água, potenciado pelo aumento da temperatura e pela diminuição substancial do OD na camada bêntica.

A vulnerabilidade do barco sul do estuário do Mondego à eutrofização está relacionada não só com um enriquecimento excessivo em nutrientes e condições ambientais favoráveis (temperatura, insolação, persistência prolongada de períodos muito secos), mas também com capacidade de exportação do sistema estuarino, associado ao tempo de residência dos nutrientes nas águas estuarinas (Duarte, 2005). Este facto, permite concluir que o estudo dos processos de eutrofização em sistemas estuarinos carece de uma abordagem abrangente, quer em termos espaciais, quer na integração da componente hidrodinâmica como elemento condicionante dos processos biogeoquímicos associados à eutrofização dos meios hídricos.

As campanhas de amostragem efectuadas nos anos 2000-2001 vieram confirmar o sucesso das medidas de gestão já implementadas, nomeadamente a recuperação (quantitativa e qualitativa) nas populações de alguns bio-indicadores (p. ex. *zebra mussels*) e a descarga preferencial do caudal do Pranto no braço norte do estuário do Mondego, na reversão do processo de eutrofização observado nas áreas mais interiores do braço sul. Registe-se que está em avaliação o efeito da reabertura do canal de montante deste braço nos respectivos valores do tempo de residência, de modo a quantificar o real impacto desta medida na melhoria da hidrodinâmica do sistema hídrico.

REFERÊNCIAS

- Almeida, J.L. e Seabra-Santos, F. (1993). Campanha de medições de níveis de maré, salinidade e temperatura no estuário do Mondego. Estudos de Engenharia Civil, 5, n.º 1, pp.1-82.
- Chapra, S. C. (1997). Surface Water-Quality Modeling, McGraw-Hill, Singapura.
- Cunha, P.P. e Dinis, J. (2001). Sedimentary dynamics of the Mondego estuary, In: Aquatic Ecology of the Mondego Basin. Global Importance of Local Experience. (ed.) Pardal, M.A., Marques, J.C. e Graça, M.A. Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra. pp. 43-62.
- DGRAH, Direcção Geral de Recursos e Aproveitamentos Hídricos (1987). Aproveitamento hidráulico do vale do Mondego. Technical Report, Lisboa.
- Duarte, A.A.L.S. (1997). Modelos de qualidade da água em estuários. Trabalho de Síntese (PAPCC), Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- Duarte, A.A.L.S. e Vieira, J.P., (2004). Factores Determinantes na Avaliação de Tempos de Residência em Estuários e sua Influência em Processos de Eutrofização. Actas do 11º Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Natal, Brasil, CD-Rom.
- Duarte, A.A.L.S., Pinho, J.L., Neto, J.M., Vieira, J.M.P., Seabra-Santos, F. (2002). Hydrodynamic modelling for Mondego estuary water quality management. Aquatic ecology of the Mondego river basin. Global importance of local experience M. A. Pardal, Marques, J. C.; Graça, M.A., ed., Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, Chapter 1.3, pp. 29-42.
- Duarte, A.A.L.S., Pinho, J.L., Pardal, M.A., Neto, J. M., Vieira, J.M.P.; Santos, F.S. (2001). Effect of residence times on river mondego estuary eutrophication vulnerability. Water Science and Technology, 44, n.º 2-3, pp.329-336.
- Martins, I., Pardal, M.A., Lillebo, A.I., Lindt, M.R., Marques, J.C. (2001). 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 and Shelf Science, 52, pp. 165-177.
- Neto, J.M. (2004). Nutrient enrichment in a temperate macro-tidal system. Scenario analysis and contribution to coastal management. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra.
- Pardal, M.A., (1998). Impacto da Eutrofização nas Comunidades Macrobenéticas do Braço Sul o Estuário do Mondego (Portugal). Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra.
- Valiela, I. (1995). Marine Ecological Processes. Spring-Verlag, New York. 686 pp.