

INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DAS DESCARGAS NO PROCESSO DE EUTROFIZAÇÃO DE SISTEMAS ESTUARINOS

António A. L. Sampaio Duarte ⁽¹⁾

Licenciatura em Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Assistente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga. Doutorando em Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga.

José M. Pereira Vieira

Licenciatura em Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. MSc. Em Engenharia Sanitária pelo IHE-Delft (Holanda). Doutoramento em Engenharia Civil pela Universidade do Minho. Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga.

Endereço ⁽¹⁾: Depto. de Engenharia Civil, Campus de Gualtar, Universidade do Minho, 4710-057 Braga, Portugal – Tel. : (351) 253 604723 – correio-e: aduarte@civil.uminho.pt

RESUMO

O elevado desenvolvimento urbanístico das regiões litorais e conseqüente crescimento demográfico tem originado frequentemente a diminuição da qualidade ambiental dos sistemas estuarinos, incrementando a complexidade de gestão dos recursos hídricos dessas regiões.

As águas estuarinas, resultantes da confluência de águas fluviais e marinhas, revelam-se favoráveis à retenção de nutrientes sustentando, assim, uma actividade biológica intensa que potencia a fixação de população nessas comunidades ribeirinhas, cuja economia assenta fundamentalmente na actividade portuária, no uso balnear e na exploração de recursos marinhos: aquicultura, salicultura, pesca e respectiva indústria transformadora. No caso concreto do estuário do rio Mondego surge ainda a orizicultura, como a actividade agrícola intensiva mais relevante do Baixo Mondego. A qualidade de vida dessas populações depende, pois, da conservação das condições naturais dos ecossistemas aquáticos e da mitigação dos impactos negativos gerados pela utilização dos meios hídricos como receptor de descargas industriais e domésticas dos aglomerados urbanos.

O processo de eutrofização dos sistemas hídricos inicia-se com o incremento de nutrientes nesse meio, resultando, da sua presença excessiva, a substituição e/ou proliferação de algumas espécies de organismos aquáticos até níveis que podem comprometer a utilização dessas águas para os seus diferentes usos. As actividades antropogénicas tornam os meios hídricos eutróficos, facto que, além de provocar uma elevada cor, turvação e redução da concentração de oxigénio dissolvido, favorece o aparecimento de microrganismos e algas libertadores de substâncias tóxicas, pondo em risco a utilização dessas águas para consumo humano e o próprio funcionamento das Estações de Tratamento de Água (ETA's). Tendo-se constatado que as condições hidrodinâmicas influenciam a ocorrência periódica de exuberâncias de macroalgas infestantes, entendeu-se que o tempo de residência no estuário de substâncias (nutrientes) potencialmente limitantes do crescimento de biomassa poderá constituir um parâmetro – chave na avaliação da vulnerabilidade deste sistema à eutrofização, quando se assume a sua variabilidade espaço-temporal devida ao regime de caudais fluviais, às características da maré, às cinéticas associadas a substâncias não-consevativas e à especificidade de cada descarga (local, carga poluente, duração e período do ciclo de maré em que ela ocorre).

Neste trabalho referem-se os procedimentos relativos à modelação hidrodinâmica (2D-H) deste sistema e apresentam-se alguns dos resultados da análise de sensibilidade da variação do tempo de residência com as características das descargas, 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 verifica no braço sul deste estuário, de modo a contribuir, no futuro, para uma selecção das práticas mais adequadas à gestão integrada deste ecossistema estuarino.

PALAVRAS-CHAVE: controlo de fontes de poluição, tempos de residência; eutrofização; gestão de sistemas estuarinos; estuário do Rio Mondego.

1. INTRODUÇÃO

A eutrofização dos sistemas estuarinos tem sido agravada pela actividade antropogénica geradora de descargas excessivas de nutrientes nestes meios receptores, devidas quer à expansão dos aglomerados urbanos ribeirinhos, quer à intensificação das actividades agrícola e aquícola. O incremento progressivo destas descargas teve consequências gravosas na ecologia dos estuários, ao propiciar a eutrofização dessas massas hídricas, que tem como consequência a proliferação de microalgas (causadoras de cor, turvação e eventual colmatação dos filtros das ETA's) e/ou alteração da estrutura macroalgal (afectando a comunidade heterotrófica) (Pardal, 1998). Este processo 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.

Foram desenvolvidas várias campanhas de amostragem no estuário do rio Mondego, que permitiram um conhecimento mais sustentado de alguns factores determinantes do processo de eutrofização do braço sul deste estuário, nomeadamente, a precipitação, os gradientes de salinidade e as condições hidrodinâmicas. Tratando-se de um sistema pouco profundo, a sua hidrodinâmica é fortemente influenciada pelo escoamento fluvial (rios Mondego e Pranto), pela batimetria e pelas acções da maré e do vento, determinando condições de mistura e transporte que afectam decisivamente as interacções associadas aos processos biogeoquímicos. Segundo Von Sperling (1999) a da 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.

Este estudo tem como objectivo contribuir para a avaliação da influência da hidrodinâmica estuarina no controlo da proliferação de macroalgas infestantes, sendo para isso necessário recorrer à modelação matemática do sistema (2D-H) de modo a estimar tempos de residência, reconhecidos como um indicador fundamental da limnologia do meio hídrico (Straskraba, 1999) e que poderá revelar-se como um parâmetro-chave na avaliação da respectiva vulnerabilidade à eutrofização (Vieira *et al.*, 1998).

Neste trabalho procurou-se evidenciar importância dos tempos de residência de substâncias no interior do sistema, analisando a sua variabilidade espaço-temporal em função de factores como o caudal fluvial e a especificidade de cada descarga (carga poluente, duração e período do ciclo de maré em que ela ocorre), prevenendo-se, em trabalhos futuros, a análise de outros factores. Estes conhecimentos, associados à modelação matemática para simulação de cenários, poderão desempenhar um papel importante na gestão integrada de ambientes estuarinos quando enquadrados em sistemas de suporte à decisão.

2. ÁREA DE ESTUDO

O rio Mondego drena uma bacia hidrográfica com uma área de cerca de 6.670 km² e uma precipitação média anual entre 1000 e 1200 mm. O estuário deste rio situa-se no litoral centro de Portugal, imediatamente a sul da cidade da Figueira da Foz, sendo constituído por dois braços (norte e sul), separados pela ilha da Murraceira, com características hidrológicas muito distintas e que se reúnem a cerca de 7 km da barra (Figura 1).

Este estuário está sujeito a um grande *stress* ambiental devido à descarga de efluentes domésticos e industriais não tratados e à actividade intensiva de orizicultura e aquíicultura, favorecendo a eutrofização progressiva do braço sul, que ao gerar condições de anoxia nos sedimentos, induz uma alteração da estrutura das camadas bênticas e da própria cadeia trófica (Pardal, 1998).

O braço norte é mais profundo (4 a 8 metros *versus* 2 a 3 m, em preia-mar) e recebe o caudal fluvial do rio Mondego, já que o assoreamento ocorrido na secção montante do braço sul apenas recebe o escoamento fluvial do rio Pranto, que é controlado por comportas destinadas a assegurar as quantidades de água necessárias à orizicultura e a impedir a intrusão de água salina durante a preia-mar. Comportando-se como uma lagoa costeira, o braço sul apresenta uma grande homogeneidade da coluna de água ao longo do ciclo de maré.

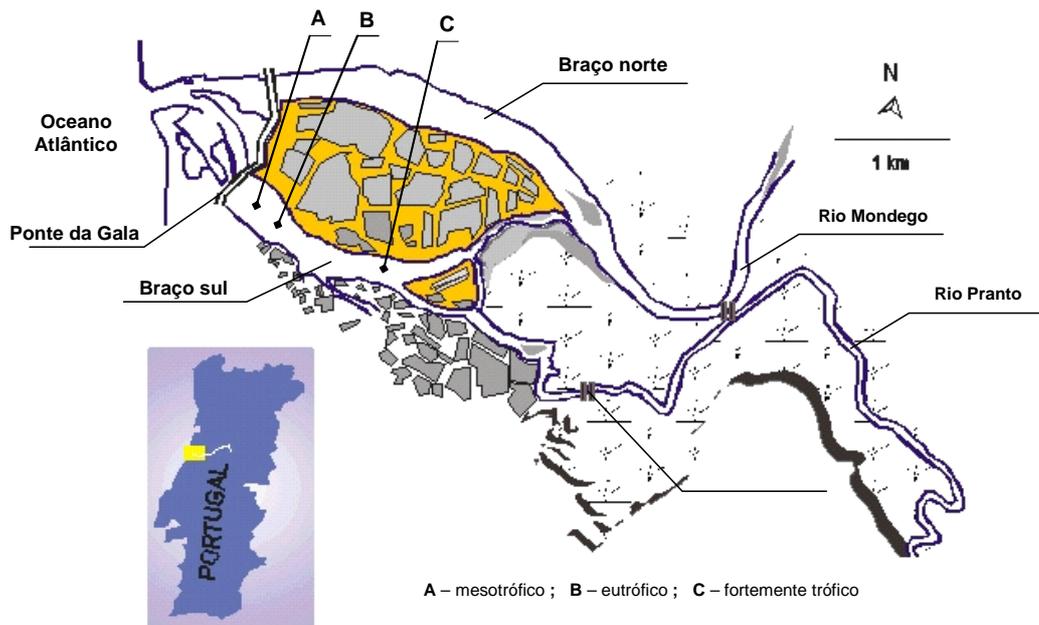


Figura 1: Estuário do rio Mondego: localização, pontos de amostragem (A, B, C), vista aérea e estado trófico do braço sul

3. METODOLOGIA

Desde 1993 tem vindo a ser efectuada campanhas de amostragem quer a nível dos sedimentos nos pontos de amostragem A, B e C assinalados na Figura 1, quer a nível da coluna de água em três locais de amostragem: Ponte da Gala, Esteiro de Lavos e foz do rio Pranto. A selecção dos pontos A, B e C foi determinada pela observação dum gradiente de eutrofização do braço sul do estuário, associado à substituição macrófitas (*Zostera noltii*) por macroalgas verdes (*Enteromorpha* spp. e *Ulva* spp.), presumivelmente devido à persistência de nutrientes na coluna de água e ao assoreamento entretanto ocorrido na sua secção de montante (Pardal, 1998).

O facto de as exuberâncias (*blooms*) algais 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 os tempos de residência de nutrientes limitantes e da velocidade de arrastamento das macroalgas, nestas ocorrências e no processo de eutrofização em geral.

Na Figura 2 apresenta-se um registo dos dados de campo obtidos entre Janeiro de 1993 e Agosto de 1994 para duas das variáveis (salinidade e rácio N:P) relacionadas com o crescimento algal.

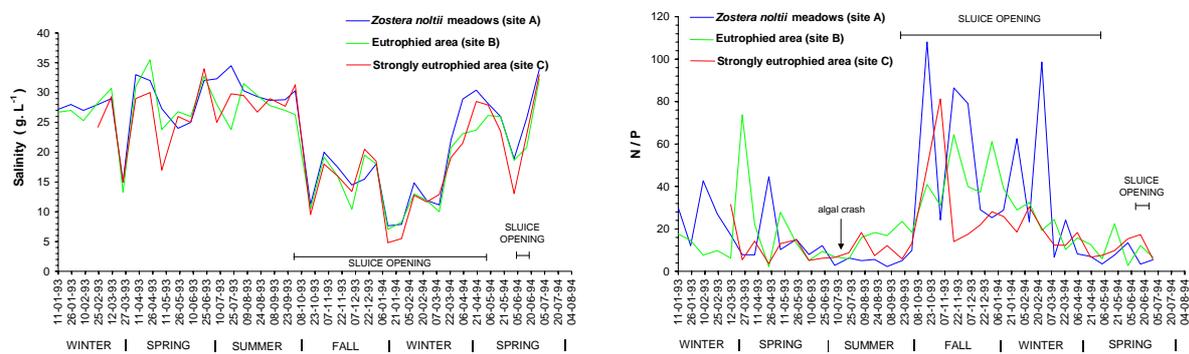


Figura 2: Resultados da campanha de amostragem (salinidade e rácio N:P)

Os locais de amostragem da coluna de água foram seleccionados de modo a permitir caracterizar a hidrodinâmica estuarina, nomeadamente as variações de velocidade e a distorção (atraso e assimetria) em relação ao ciclo de maré, e obter dados de qualidade da água associados aos parâmetros hidráulicos.

Com base nestes dados procedeu-se à modelação matemática do estuário do rio Mondego, inicialmente apenas restrito ao braço sul e unidimensional, com o objectivo de estimar o balanço de nutrientes (nitratos, nitritos e fosfatos), tendo-se constatado a existência de um elevado consumo de nitratos no interior do sistema (Duarte, 1997).

Posteriormente, face a influência do caudal fluvial do rio Mondego, em situações de cheia, na qualidade da água do braço sul através do prisma de maré, verificou-se ser necessário recorrer à modelação bidimensional (2D-H) da totalidade do estuário, aplicando os modelos RMA2 para estimar a altura e a velocidade média da água ao longo do ciclo de maré e RMA4, para avaliar a distribuição espacio-temporal da concentração de parâmetros de qualidade da água. Para esse efeito, procedeu-se à digitalização da batimetria e à definição de uma malha de elementos finitos (Figura 3).

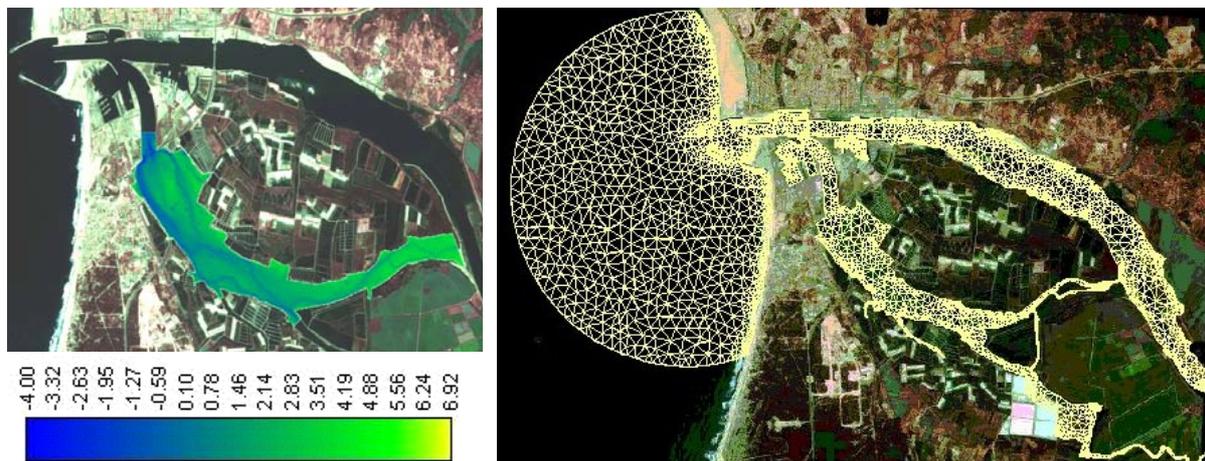


Figura 3: Batimetria do braço sul e malha de elementos finitos

Na análise de sensibilidade à variação espacial do tempo de residência considerou-se uma substância conservativa e as acções da maré, do vento e baroclínicas invariáveis. Para cada ponto do sistema, considerou-se que o tempo de residência corresponde ao período de tempo em que a concentração da substância permanece superior ao seu valor inicial (Duarte *et al.*, 2001)

Os cenários simulados nesta na primeira fase do estudo estão sistematizados na Tabela 1, apresentando-se neste trabalho os resultados correspondentes aos cenários C1, C2, C5 e C10.

Tabela 1: Cenários simulados

| Caudal do rio Pranto (m ³ /s) | 5 | | | | 15 | | | |
|------------------------------------------|------|----|------|----|------|-----|------|-----|
| Massa da substância (kg) | 1800 | | 3600 | | 1800 | | 3600 | |
| Instante da descarga (h) | 6 | 9 | 6 | 9 | 6 | 9 | 6 | 9 |
| Duração da descarga (h) | | | | | | | | |
| 1 | C1 | C2 | C6 | C7 | C11 | C12 | C16 | C17 |
| 3 | C3 | C4 | C8 | C9 | C13 | C14 | C18 | C19 |
| 6 | C5 | | C10 | | C15 | | C20 | |

A maré seleccionada apresenta alturas de água entre 0,7 m (baixa-mar) e 3,3 m (preia-mar), correspondendo a um prisma de maré no braço sul estimado em $2,6 \times 10^6 \text{ m}^3$.

4. RESULTADOS

Na Figura 4 apresentam-se alguns resultados da modelação hidrodinâmica que foram calibrados com os dados obtidos nas campanhas de amostragem e que são utilizados posteriormente no modelo de qualidade da água.

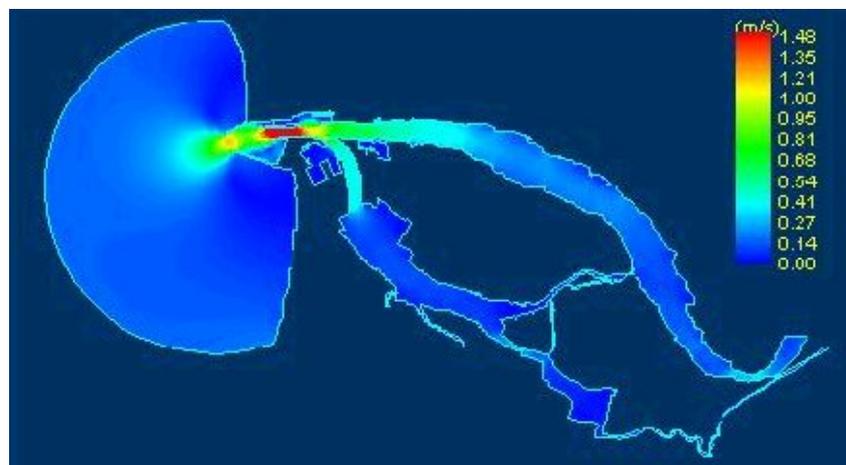


Figura 4: Distribuição de velocidades durante a preia-mar

A Figura 5 ilustra uma situação durante a enchente, que demonstra claramente o atraso na elevação da superfície livre do escoamento no braço sul, relativamente ao do braço norte, devido à sua configuração geométrica e batimetria.

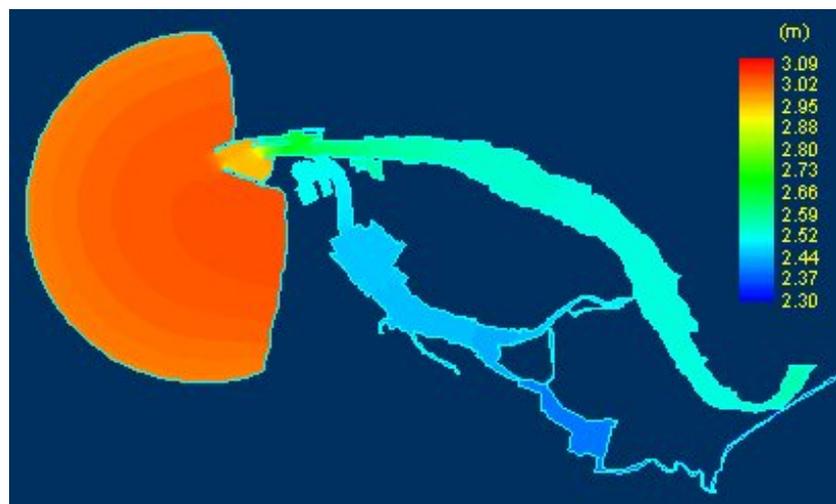


Figura 5: Elevação da superfície livre durante a enchente

A análise dos dados obtidos nas campanhas de amostragem permitiram retirar algumas conclusões importantes:

- o caudal fluvial do rio Pranto depende da precipitação e da abertura das comportas, a qual depende fundamentalmente da quantidade de água requerida para a orizicultura, facto que determina um desfasamento temporal desses eventos;
- verifica-se uma correspondência directa entre os valores máximos da velocidade e as marés de maior amplitude. Esses valores são mais elevados quando ocorre a abertura das comportas, aumentando a turvação na coluna de água devido ao incremento da ressuspensão de sedimentos;
- as concentrações de nitritos e nitratos aumentam durante o Outono e o Inverno, estando fortemente correlacionadas com os caudais fluviais e não com a precipitação. As concentrações mais elevadas de ortofosfatos na coluna de água ocorrem nos meses de Verão, pelo facto do aumento da temperatura favorecer a libertação do fósforo acumulado nos sedimentos;
- a produção primária nem sempre é limitada pelo fósforo (expectável face à ocorrência de elevados valores do rácio N:P) dado que a assimilação de nutrientes pelas macroalgas depende do gradiente entre a concentração desses nutrientes nas suas células e na coluna de água; (Martins *et al.*, 2001)
- no que se refere ao transporte de nutrientes, a fracção dissolvida é a mais representativa, seguindo-se a fracção em suspensão, já que a flutuação de macroalgas só é significativa durante a ocorrência (sazonal) de exuberâncias algais.

Os valores dos tempos de residência obtidos, no braço sul do estuário, para os diferentes cenários simulados (Figura 6) permitem estabelecer as zonas mais vulneráveis ao processo de eutrofização, admitindo que o enriquecimento em nutrientes pode ser traduzido pela maior permanência dessas substâncias nas zonas consideradas, por isso, mais sensíveis. Estes resultados traduzem o gradiente de eutrofização observado neste braço e que se indicou na Figura 1.

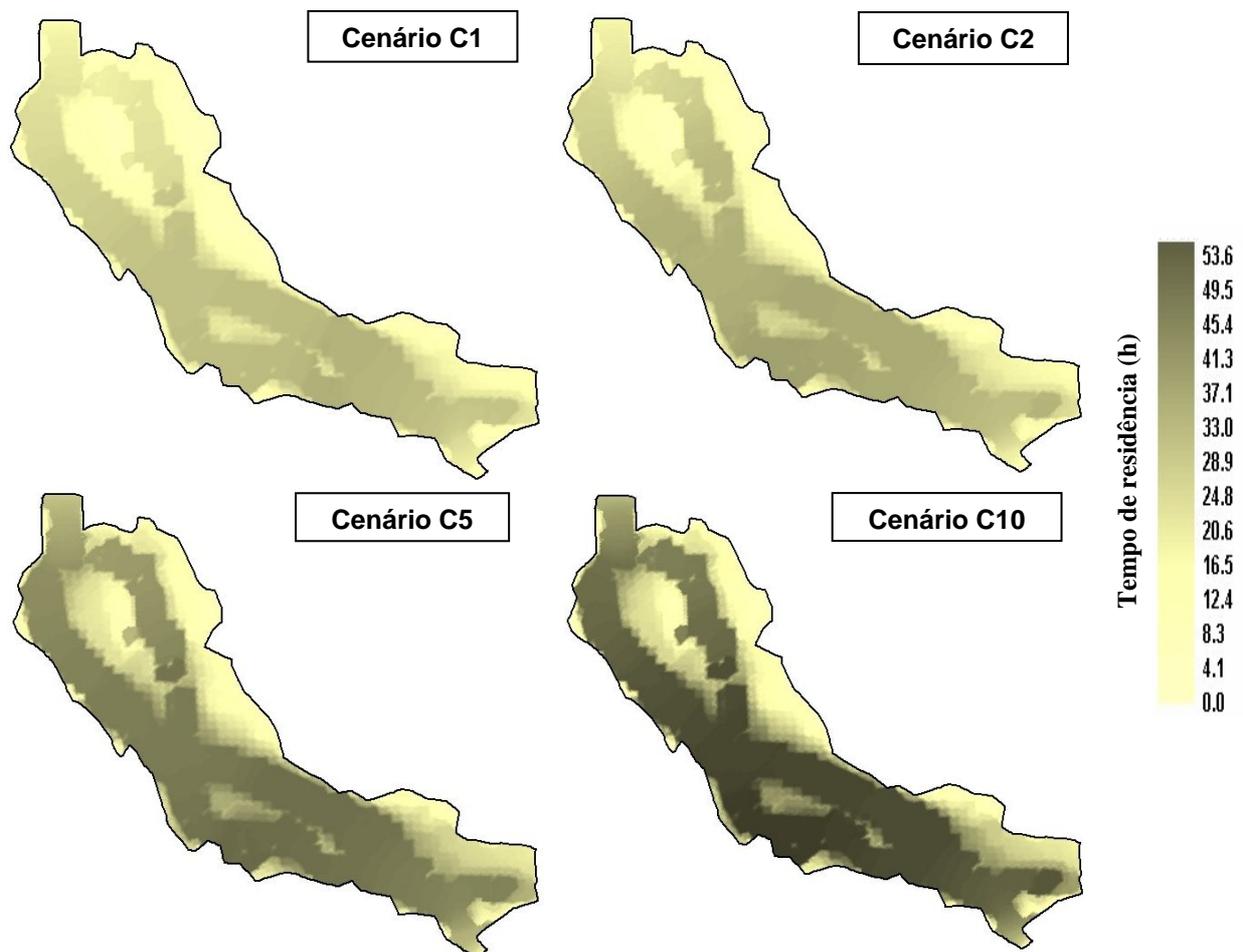


Figura 6: Variação espacial do tempo de residência

A comparação dos resultados obtidos nos cenários C1 e C5 permite avaliar o efeito da duração da descarga na variação dos valores do tempo de residência. Por sua vez, a comparação dos cenários C1 e C2 ilustra a menor sensibilidade da variação dos tempos de residência ao instante do ciclo de maré em que se inicia a descarga (enchente ou vazante), mantendo-se constantes a massa e a duração dessa descarga, bem como o caudal fluvial no rio Pranto. O efeito da carga poluente nos tempos de residência pode ser visualizado através da comparação dos cenários C5 e C10.

Nestas condições, a duração das descargas afigura-se como um dos factores determinantes da variação dos tempos de residência. Com base nesta informação, a gestão da qualidade da água neste sistema, indicaria, como procedimento adequado, uma operação das comportas, se necessária, baseada em aberturas mais frequentes mas de menor duração.

5. CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

- Face à especificidade de cada ecossistema estuarino, a identificação das variáveis que afectam a proliferação de biomassa algal e a quantificação da sua influência contribuem decisivamente para aprofundar os conhecimentos dos processos de eutrofização e para encontrar as soluções mais adequadas para ultrapassar este grave problema ambiental;
- No braço sul a duração da enchente vai diminuindo para montante, sendo sempre inferior à duração da vazante, devido à acção dos caudais fluviais e à sua baixa profundidade;
- O caudal fluvial, a precipitação, a localização, duração e carga poluente das descargas são factores determinantes quer do tempo de retenção de nutrientes no sistema quer do crescimento de biomassa algal, favorecendo ou contrariando a fixação de macroalgas infestantes;
- Apesar do seu carácter preliminar, os resultados obtidos representam um passo importante na definição da escala temporal dos processos de eutrofização em sistemas estuarinos, já que os resultados da modelação da qualidade da água confirmaram o gradiente de eutrofização revelado pelas medições efectuadas no braço sul do estuário do rio Mondego, validando desse modo a metodologia aplicada;
- 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 gestão sustentada de ambientes estuarinos vulneráveis a fenómenos de eutrofização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Duarte A.A.L.S. (1997). *Modelos de Qualidade da Água em Estuários*. Trabalho de Síntese. Universidade do Minho, Braga, Portugal.
2. Duarte, A.A.L.S., Pinho J.L.S., 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** (2-3), 329-336.
3. Martins I., Pardal M.A., Lillebø A.I., Flindt 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**, 165-177.
4. Pardal M.A (1998). *Impacto da Eutrofização nas Comunidades Macrobentónicas do Braço Sul do Estuário do Mondego (Portugal)*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Portugal.
5. Straskraba, M. (1999). *Retention Time as a Key variable of Reservoir Limnology*. Theoretical Reservoir Ecology and its Applications. Ed. J.G. Tundisi e M. Straskraba, Editora Backhuys.
6. Vieira, J.M.P., Pinho J.L.S., Duarte, A.A.L.S. (1998). *Eutrophication Vulnerability Analysis: a Case Study*. Water Science and Technology, **37** (3), 121-128
7. Von Sperling, E. (1999). *Morfologia de Lagos e Reservatórios*. DESA/UFMG, Belo Horizonte.