

# MODELAÇÃO DO IMPACTE PRODUZIDO PELO AUMENTO DE NUTRIENTES NA PRODUÇÃO PRIMÁRIA DO ESTUÁRIO DO SADO

Flávio Martins<sup>1</sup>, Ramiro Neves<sup>2</sup>, Pedro Pina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Algarve, Campus da Penha 8000-117 Faro. [fmartins@ualg.pt](mailto:fmartins@ualg.pt)

<sup>2</sup> Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1049-001 Lisboa. [ramiro.neves.maretec@taguspark.pt](mailto:ramiro.neves.maretec@taguspark.pt) ; [ppina.maretec@taguspark.pt](mailto:ppina.maretec@taguspark.pt) .

## Resumo

Os modelos matemáticos são ferramentas poderosas para avaliar o impacto humano em sistemas costeiros e estuarinos de estrutura complexa. Neste artigo utiliza-se um sistema de modelos para caracterizar o estado trófico do estuário do Sado e para prever a sua evolução baseada em diferentes cenários de intervenção humana. Analisa-se em pormenor o efeito do aumento de nutrientes introduzidos no estuário através do rio. Este estudo permite tirar conclusões sobre o impacto que esse aumento terá sobre o estuário. O sistema de modelação é composto por um modelo hidrodinâmico tridimensional às equações primitivas e modelos de transporte acoplados a modelos de transporte de sedimentos, modelos de qualidade da água e modelos ecológicos. O modelo hidrodinâmico encontra-se calibrado e validado para o sistema. Utilizam-se dados de campo de nutrientes e de fitoplâncton para comparação com os resultados do modelo. Analisam-se as características do sistema e efectua-se uma análise de sensibilidade do comportamento biológico do estuário face ao aumento da carga de nutrientes. As conclusões principais são: Confirmação da adequabilidade da metodologia utilizada para a simulação da situação actual do estuário; Pequena sensibilidade do estuário a aumentos moderados da carga de nutrientes; Sensibilidade moderada do estuário para elevadas cargas de nutrientes.

## Estuário do Sado

O estuário do Sado possui um comprimento de cerca de 20 Km e uma largura de aproximadamente 4 Km como se pode observar na figura 1. A sua profundidade média é de 8 m. Do ponto de vista morfológico a região de montante do estuário possui

características distintas da região de Jusante: A montante os sedimentos são compostos essencialmente pelas fracções finas formando zonas de Sapal que ocupam cerca de 30% da área. O Canal da Marateca estende-se para Norte possuindo a maior área de Sapal do estuário. Na região de jusante os sedimentos são areias que formam bancos ao largo da cidade de Setúbal. Estes bancos dividem o estuário em dois canais com características diferentes e que condicionam a hidrodinâmica dessa região.

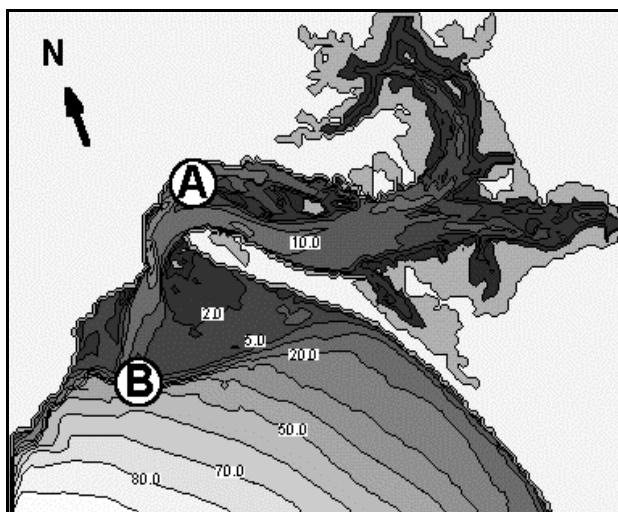


Figura 1 - Batimetria do Estuário do Sado

O estuário propriamente dito liga ao rio Sado através do canal de Alcácer. Este canal apresenta características estuarinas marcadamente diferentes das anteriores. O gradiente horizontal de salinidade é elevado ocorrendo o máximo de turbidez nessa região. O estuário é uma região importante tanto do ponto de vista económico como ecológico. O turismo, a pesca e a aquacultura são actividades importantes para a região. As regiões de sapal são também áreas preferenciais para a nidificação de aves marinhas. Grande parte do estuário possui o estatuto de reserva natural. Análises da evolução da biomassa de fitoplâncton durante os últimos 10 anos indicam que o ecossistema se encontra numa situação relativamente estável, exibindo pouca tendência para a eutrofização [2].

A agricultura é uma das principais actividades exercidas na bacia hidrográfica do Rio Sado. Destacam-se as plantações de arroz, tomate e trigo. A intensificação dessa actividade com o aumento de irrigação associado irá representar um aumento considerável dos nutrientes introduzidos no rio e no estuário. O efeito da carga adicional

de nutrientes no ecossistema estuarino é analisado neste artigo do ponto de vista da produção primária de fitoplâncton.

### **Sistema de Modelos**

O sistema de modelação é composto por um modelo hidrodinâmico baroclínico tridimensional às equações primitivas acoplado a dois modelos de transporte: Um utilizando uma formulação lagrangiana e outro utilizando uma formulação do tipo euleriano. Estes modelos de transporte têm uma concepção genérica sendo utilizados para forçar os modelos de transporte de sedimentos e o modelo ecológico. Analisam-se de seguida as características gerais de cada um destes modelos. O modelo hidrodinâmico resolve as equações primitivas na forma cartesiana considerando equilíbrio hidrostático e a aproximação de Boussinesq (massa específica constante excepto quando multiplica pela aceleração da gravidade) [5]. As equações são resolvidas recorrendo ao método do volume finito [6].

Os modelos de transporte resolvem ambos as equações tridimensionais de advecção difusão usando um esquema numérico semi implícito equivalente ao do modelo hidrodinâmico. A formulação em coordenadas de Euler ou de Lagrange diferenciam os dois modelos. Desta forma o modelo euleriano utiliza a malha computacional do modelo hidrodinâmico e o modelo lagrangiano é aplicado a traçadores emitidos no interior do domínio. As variáveis turbulentas do modelo hidrodinâmico são utilizadas em ambos os modelos para calcular a dispersão. Os modelos de transporte são implementados numa arquitectura genérica que permite a sua aplicação ao transporte de qualquer variável. Desta forma utilizam-se os mesmos modelos de transporte para o transporte das propriedades da água, dos sedimentos e das variáveis do modelo ecológico.

O modelo de transporte de sedimentos permite a simulação de sedimentos coesivos e de areias. Utiliza os modelos de transporte comuns do sistema de modelação sendo formulado numa metodologia a zero dimensões. Isto significa que o mesmo modelo pode ser utilizado tanto pelo modelo de transporte lagrangiano como pelo modelo de transporte euleriano. O modelo de transporte de sedimentos integra na velocidade do sedimento uma velocidade vertical que é função da sua dimensão. Para o caso dos sedimentos coesivos a dimensão da partícula é função das suas propriedades e das

propriedades da água, que em conjunto controlam a floculação. As trocas com o fundo são baseadas em diferentes formulações em função do tipo de sedimento. As características do fundo e as leis de interação com a coluna de água podem ser definidas localmente de forma diferente para cada região do domínio.

O modelo ecológico encontra-se também implementado numa metodologia a zero dimensões. Simula-se o ciclo do Azoto, as concentrações de Oxigénio Dissolvido e CBO e as populações de Fito e Zooplâncton. As espécies do ciclo do Azoto incluem as suas três principais formas inorgânicas: Amónia, nitrato e nitrito, assim como três formas orgânicas de azoto: Fracções refractária e não refractária do azoto orgânico dissolvido, e azoto orgânico particulado. Apresenta-se na figura 2 um esquema conceptual do modelo utilizado. Os produtores primários (fitoplâncton) consomem amónia e nitrato, dependendo da disponibilidade destes nutrientes e da radiação solar como fonte(s) de energia para a fotossíntese. O nível trófico seguinte consome os compostos orgânicos sintetizados pelos produtores primários, sendo por sua vez consumidos pelos níveis tróficos superiores. As excreções do fitoplâncton incluem amónia, azoto orgânico particulado (PON) e azoto orgânico dissolvido lábil (DNRON). Por sua vez, a decomposição do azoto orgânico particulado produz amónia e azoto orgânico dissolvido refractário (não lábil), (DRON).

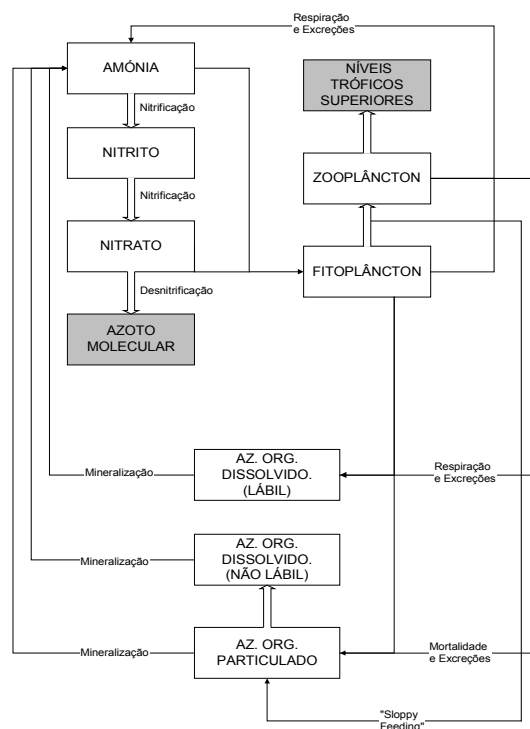


Figura 2: Esquema do modelo ecológico.

A remineralização do azoto orgânico dissolvido a amónia só é conseguida, no caso refractário, numa escala temporal de anos. O processo da nitrificação é constituído pela transformação da amónia em nitrito e, posteriormente, em nitrato. Não é considerada no modelo a fixação atmosférica de azoto. A geralmente pequena importância da fixação de  $N_2$  em água salgada justifica a não inclusão deste termo nas equações da amónia.

## Simulações

O objectivo deste estudo é determinar o impacto que um aumento de nutriente do rio Sado tem sobre a produção primária do estuário. A análise deve por isso realizar-se com simulações com períodos de vários anos de forma a permitir estabilizar o comportamento das populações. Do ponto de vista computacional o tempo de cálculo foi diminuído usando condições hidrodinâmicas cíclicas. Neste método usam-se os campos hidrodinâmicos de um ciclo de maré para forçar os modelos de transporte. Usou-se uma malha computacional com passo variável entre 400 e 2300 metros com 60x79 células e apenas uma camada na direcção vertical. O modelo hidrodinâmico foi previamente validado usando medidas em diversos pontos do estuário [6]. Efectuaram-

se 3 simulações de 3 anos de duração cada uma. Os valores das variáveis introduzidas pelo rio foram as constantes da tabela 1.

O aumento de caudal do rio pode alterar a hidrodinâmica no interior do estuário tanto de forma directa, devido à introdução de momento, como indirectamente devido à alteração da distribuição de salinidade. Este efeito no entanto não se espera ser significativo uma vez que estudos anteriores mostraram que a influência do rio no forçamento hidrodinâmico é pequena, tanto na sua componente barotrópica como baroclínica. Neste estudo optou-se por esse motivo por analisar a influência do aumento de nutrientes no estuário um caudal médio constante de 10 m<sup>3</sup>/s.

<b>Prop.</b>	<b>Ref.</b>	<b>2x</b>	<b>3.5x</b>
Nitrato mgN/l	3,6	7,2	12,6
Nitrito mgN/l	0,04	0,08	0,14
Amónia mgN/l	0,24	0,48	0,84
Caudal	10 m <sup>3</sup> /s		
Sedimentos	200 mg/l		
Salinidade	0 ppm		
Temperatura	18 °C		
Oxigénio	8 mg/l		
Zooplankton	0 mgC/l		
Phytoplankton	0,9 mgC/l		
DNRON	0,2 mgN/l		
DRON	0 mgN/l		
PON	0,2 mgN/l		

Tabela 1: Variáveis de entrada para as simulações.

## Resultados

Para a simulação de referência utilizaram-se valores extraídos da literatura tendo-se efectuado uma calibração preliminar e qualitativa do modelo ecológico. Os dados disponíveis não permitem uma calibração completa nem a validação do modelo, sugerindo a necessidade de campanhas de medições. Foram determinadas séries temporais dos valores simulados em pontos representativos do estuário, tendo sido também determinadas médias espaciais. Para essas médias dividiu-se o estuário em sete zonas (caixas) como indicado na figura 3. Na figura 2 compara-se a série temporal da concentração média de fitoplâncton na caixa 6 no segundo ano de simulação, com os

valores da literatura para pontos na mesma zona [2]. Os valores obtidos apresentam uma elevada variabilidade de alta frequência associada ao ciclo semi-diurno da maré. Calculou-se por isso o valor médio, utilizando médias móveis com uma amostragem de 50 horas. Apesar das condições iniciais e fronteira utilizadas na simulação serem condições médias e por isso não estarem directamente relacionadas com as condições nos anos das campanhas, os resultados obtidos são qualitativamente semelhantes aos valores das medidas. Isto verifica-se relativamente à sua ordem de grandeza e também relativamente ao seu comportamento anual, sendo possível detectar os “blooms” de Primavera e de fim de Verão nos instantes correctos.

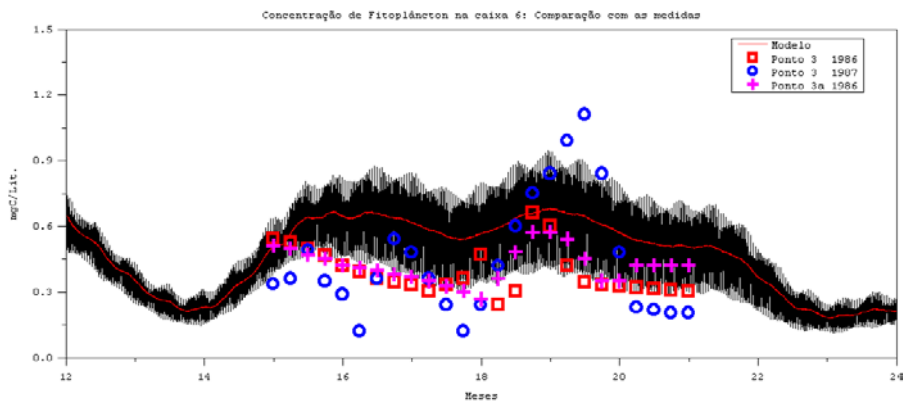


Figura 2: Comparação da evolução temporal de fitoplâncton na caixa 6 com as medidas.

Os bons resultados obtidos nesta comparação fornecem alguma segurança quanto à qualidade das simulações, no entanto a falta de dados experimentais permite apenas uma análise qualitativa dos resultados.

Na figura 3 representam-se as médias anuais da concentração de fitoplâncton nas seis caixas definidas.

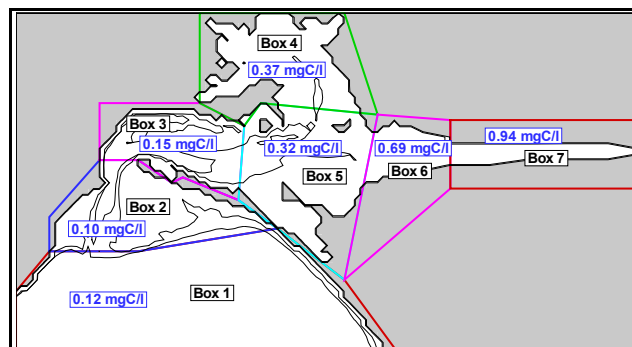


Figura 3: Concentração média anual de fitoplâncton para as condições de referência.

As maiores concentrações ocorrem na caixa 7 que coincide com o Canal de Alcácer e na caixa 6 na zona de ligação ao estuário propriamente dito. As concentrações destas duas zonas são uma a duas ordens de grandeza superiores às encontradas no resto do estuário. Estes resultados são confirmados pela literatura [3]. De acordo com alguns autores [1, 4] estes valores são típicos de estuários medianamente produtivos, sem problemas de eutrofização generalizada.

Os valores totais anuais das trocas entre caixas foram também calculados. Para esse cálculo integraram-se os fluxos instantâneos das propriedades entre as células das caixas adjacentes. Na figura 4 representam-se os valores totais de fitoplâncton trocados entre caixas para um ano típico.

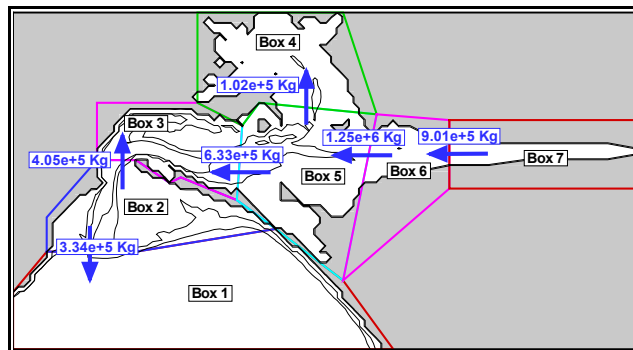


Figura 4: Transporte total de fitoplâncton entre caixas para a situação de referência

Utilizando as condições fronteira do rio apresentadas na tabela 1 efectuaram-se duas simulações para analisar a sensibilidade do estuário ao aumento da carga de nutrientes. Nas figuras 5 e 6 apresentam-se os valores das concentrações médias anuais de fitoplâncton para as duas simulações.

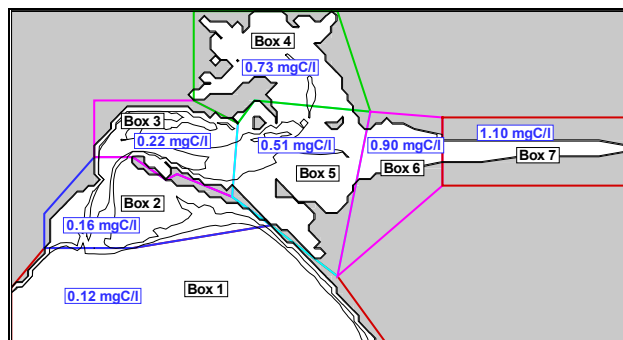


Figura 5: Concentração média anual de fitoplâncton para a simulação 2x.

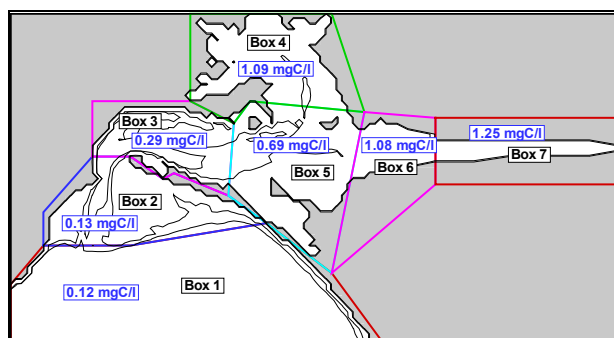


Figura 6: Concentração média anual de fitoplâncton para a simulação 3,5x.

Verifica-se que nas caixas 6 e 7 onde a produção era já elevada os aumentos de concentração são pequenos. A região de jusante do estuário (caixas 3, 4 e 5) apresenta uma maior sensibilidade ao aumento da carga de nutrientes com aumentos de concentração significativos. Na tabela 2 encontram-se calculadas as variações percentuais relativamente à simulação de referência, da concentração média anual de fitoplâncton para todas as caixas.

	Cx. 1	Cx. 2	Cx. 3	Cx. 4	Cx. 5	Cx. 6	Cx. 7
Ref.	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2X	0%	60%	47%	97%	59%	30%	17%
3,5X	0%	30%	93%	195%	116%	57%	33%

Tabela 2: Variações percentuais da concentração média anual de fitoplâncton.

Foram também calculados os valores das trocas totais anuais de fitoplâncton entre as caixas para as simulações de análise de sensibilidade. Nas figuras 7 e 8 apresentam-se esses valores.

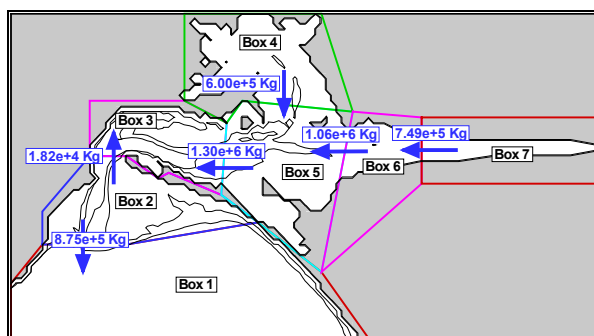


Figura 7: Transporte total de fitoplâncton entre caixas para a simulação 2x.

Como se pode observar, as trocas entre as regiões de montante (caixas 6 e 7) e o resto do estuário diminuíram. Isto indica uma maior produção no estuário inferior. O mesmo se verifica para as trocas entre as caixas 4 e 5. Nesse caso a direcção das trocas totais inclusivamente mudou de direcção, comportando-se agora a região do Canal da Marateca como exportadora de fitoplâncton.

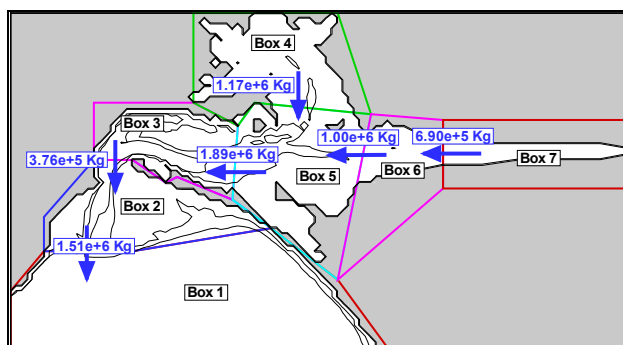


Figura 8: Transporte total de fitoplâncton entre caixas para a simulação 3,5x.

## Conclusões

Os resultados apresentados parecem sugerir que o estuário possui alguma sensibilidade ao aumento de nutrientes por via fluvial mas que a situação presente não é preocupante e que um aumento moderado de nutrientes não produzirá uma situação de eutrofização generalizada. Deve-se notar que os valores das concentrações de nutrientes utilizados na análise de sensibilidade são valores excessivamente elevados, só devendo ocorrer na natureza em situações de excepção. Este estudo foi efectuado considerando condições médias anuais para o caudal e concentrações do rio. É de esperar alguma sensibilidade à variação temporal destas condições.

## REFERÊNCIAS

- [1] Anderson, G., *Silica, diatoms and a freshwater productivity maximum in Atlantic coastal plain estuaries, Chesapeake Bay*, Estuarine Coastal and Shelf Science, 22, 183-197, 1986.
- [2] Cabeçadas, L., *Ecologia do Fitoplâncton do Estuário do Sado: para uma estratégia de conservação*. Estudos de conservação da Natureza 10, SNPRCN, 1993.
- [3] Coutinho, M., *Variação espacio-temporal do fitoplâncton no Estuário do Sado*. Seminário sobre recursos haliêuticos, ambiente, aquacultura e qualidade do pescado da península de Setúbal, IPIMAR, 79-88, 1994.

- [4] Mallin, M., Paerl, H. e Rudek, J., *Seasonal phytoplankton composition productivity and biomass in the Neuse River estuary, North Carolina*, Estuarine Coastal and Shelf Science, 32, 609-623, 1991.
- [5] Martins, F., Neves, R. e Leitão, P., *A three-dimensional hydrodynamic model with generic vertical coordinate*, Proceedings de Hydroinformatics'98, vol. II, V. Babovic & L. C. Larsen (Eds.), Balkema, 1403-1410, 1998.
- [6] Martins, F., Neves, R., Leitão, P. e Silva, A., *3D modeling in the Sado estuary using a new generic coordinate approach*, Oceanologica Acta, 24, S51-S62, 2001.