

Um modelo de análise da qualidade das águas estuarinas

José Luís G. Santos Ribeiro

Professor Coordenador do ISEC - Lisboa. Director da Unidade de Planeamento da ANPC

j.ribeiro@prociiv.pt

1. Introdução

Os estudos sobre a evolução dos ambientes estuarinos são diversificados no âmbito e, porventura, os que apresentam maior grau de variabilidade espacial no jogo dos factores, dadas as dinâmicas naturais e antropogénicas que conjugam renovados valores holísticos nos sistemas de interface.

São inúmeros os modelos que abordam os estados destes sistemas, a maioria incidindo em aspectos específicos da biologia, da bioquímica, da dinâmica sedimentar, da hidrologia, ou da estabilidade ecológica face aos impactes que afectam as margens, as superfícies intermareais e os meios aquáticos (e.g. CUNHA *et al.*, 1997; ACABADO, 1998; PARDAL e MARQUES, 1998; RIBEIRO, 2001; CARMO, 2004). Nesse contexto, no conjunto dos indicadores estruturantes da estabilidade ambiental, sobressaem os parâmetros de qualidade da água, com natural destaque para os que têm um poder explicativo global sobre o bem-estar de áreas confinantes interactivas e com significativas alterações espaço-temporais. Mas também existe um campo vasto de incerteza quando a recolha e o tratamento dos dados são incessantemente confrontados com novas diferenças, novas mudanças, algumas contradições e dificuldade em encontrar comportamentos padronizados, mesmo nas áreas melhor caracterizadas e consensuais no que diz respeito a orientações de ordenamento da ocupação e dos usos do solo.

Sendo as zonas húmidas estuarinas caracterizadas pela sua elevada produtividade biológica e por intensa exploração dos recursos naturais, há grande interesse em encontrar procedimentos de análise simples e harmonizados que facilitem a integração de dados nas suas expressões numérica, gráfica e cartográfica. E que a metodologia aplicada sirva simultaneamente os gestores, os usufrutuários livres do domínio público hídrico e as explorações aquícolas de mercado.

A mudança é o carácter mais importante neste esboço de modelação e a própria salinidade um factor intrínseco no seu escalonamento. Assume-se, por isso, que a penetração do meio marinho no interior do estuário gradua a qualidade do meio aquático para grande parte dos organismos residentes e migrantes,

sendo essencial para o bom desempenho das espécies, dos habitats e das próprias unidades económicas.

Como ponto de partida e considerando as relações de dependência possíveis, pode dizer-se que os modelos de qualidade da água se baseiam, essencialmente, em concentrações adequadas de Oxigénio Dissolvido (GREEN e GARRIT, 1967; POUCHEN *et al.*, 2004); na manutenção do pH próximo do valor neutro (7,0) para a água doce e tendencialmente acima de 8,0 para a água salina (WEISS, 1970); e em concentrações de determinados compostos químicos dentro de valores não tóxicos (WETZEL, 1993; PINHO *et al.*, 2001; CARMO, 2004).

O próprio conceito de "qualidade da água" pode implicar um conjunto muito vasto de variáveis difíceis de relacionar numa lista de produtos que inclui substâncias perigosas, bioacumuláveis e persistentes, as quais afectam e alteram os biota, mas que estão ausentes na maioria dos modelos de síntese que resultam de projectos espacialmente abrangentes (PINHO *et al.*, 2001; CUNHA e DINIS, 2002). E isso acontece porque, frequentemente, é mais importante o diagnóstico funcional que permita, de uma forma abrangente, caracterizar o pulsar de todo o ambiente estuarino e os sinais típicos do bom ou mau estado dos sectores mais sensíveis e das dinâmicas que os estimulam, com rápidas variações de conteúdo.

No caso dos estuários e zonas costeiras adjacentes, os principais impactes sobre os meios aquáticos estão identificados, resultando das descargas crescentes de compostos orgânicos, fertilizantes agrícolas e efluentes domésticos ricos em azoto que, conjugadamente, promovem a eutrofização e contribuem para crescentes distúrbios nas cadeias tróficas e nos habitats de interface (RIBEIRO, 2006). Interessa, pois, identificar as variáveis que respondem isoladamente às mudanças e evolução do meio, bem como as interdependências nas respostas e os factores que as estimulam.

Então, considerando o objectivo de definir perfis de estado, identificáveis num modelo integrador, foi definida uma metodologia de aquisição e

manipulação de dados que se fundamenta na monitorização selectiva e simultânea de parâmetros que têm um elevado grau de interdependência específica, como sejam: a Salinidade, o Oxigénio Dissolvido (OD) e o pH. Antes de mais, pelas relações causais estabelecidas pela Salinidade que exprime as fronteiras espaciais e as correspondentes graduações do ambiente estuarino (BONDS, 1996; CUNHA *et al.*, 1997; RIBEIRO, 2002); mas também porque qualquer deles tem um grande poder explicativo sobre o estado dos sistemas (SWENSON, 2004), o que se confirma na análise correlacionada da redução/oxidação (Redox em mV) e da influência de outros factores complementares (temperatura, turbidez, nitratos, fosfatos).

2. Materiais e métodos

O processo de monitorização dos subsistemas estuarinos do Mondego, aqui referenciado, decorreu essencialmente nos anos de 2002 a 2004. Na recolha da informação foi utilizado diverso material e equipamento, com destaque para:

- Embarcação Fibramar 500 (adequada a águas baixas de maré e de canais);
- Sonda marítima Eagle;
- Refractómetro (salinómetro) oxyguard handy Held;

- Oxímetro Oxyguard delta;
- Potenciómetro Oxyguard com sondas pH e Redox;
- GPS Maggellen 320 (com geoposicionamento em sistemas UTM e WGS 84);
- Reagentes Hagen (NO₂, NO₃, PO₄);
- 2 aquários de vidro e sistema de arejamento Elite;
- Ortofotos e cartas de batimetria.

Foram seleccionadas 25 estações fixas de monitorização (Figura 1): 11 no Braço Norte, 13 no Braço Sul e 1 na zona costeira a norte dos molhes portuários, segundo os seguintes critérios:

- Distribuição espacial homogênea;
- Sequência do domínio marinho para o fluvial;
- Circulação mareal e correntes preponderantes;
- Posição relativa face a focos de poluição;
- Localização junto às margens e no leito central.

Por seu lado, a organização da informação obedeceu aos seguintes critérios distintivos:

- Momento mareal (preia-mar, baixa-mar, meia-maré);
- Período lunar (marés-vivas e marés-mortas);
- Estação do ano (Verão e Inverno);
- Subsistemas do Mondego (Braço Norte e Braço Sul).

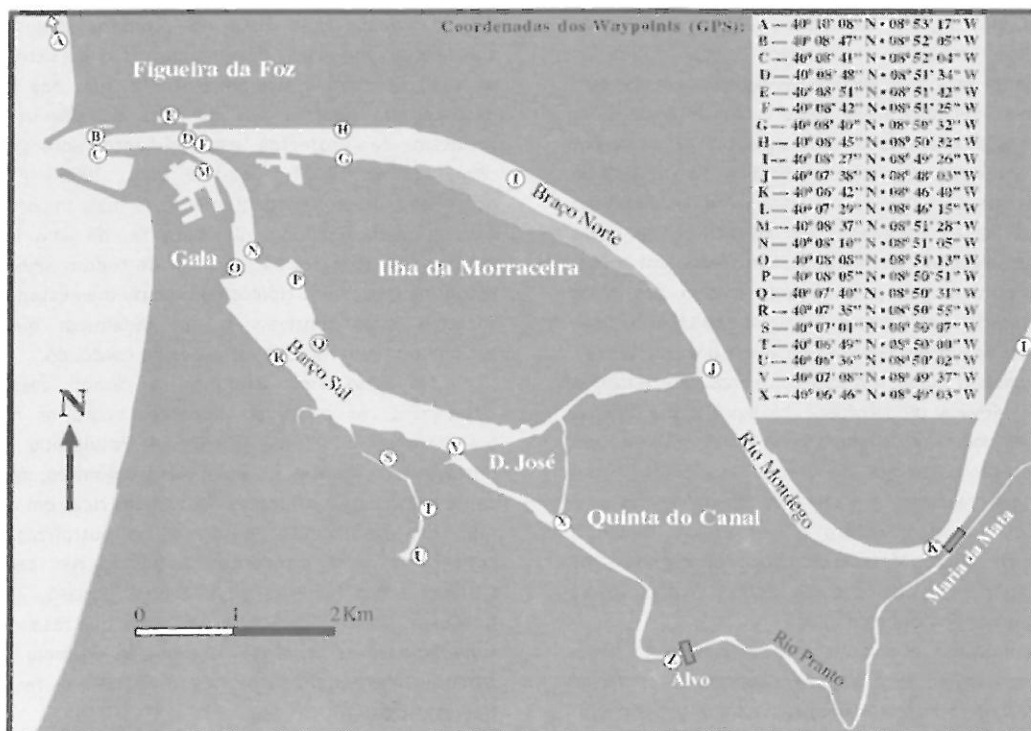


Figura 1

Localização dos principais pontos de monitorização no estuário do Mondego

Nesta fase, optou-se apenas pela amostragem superficial (análise bidimensional), uma vez que esta é representativa dos impactes a que o estuário está sujeito, desde logo porque grande parte dos focos de poluição provêm de sistemas de água doce (menos densa) e que, por exemplo, a temperatura mais elevada dos efluentes urbanos e industriais impulsiona estas águas e os seus conteúdos para a superfície.

Além disso, por limitação de tempo, apoio logístico e segurança da navegação, não foram realizadas medições nocturnas com um carácter sistemático aceitável que pudesse explicar as diferenças relativamente aos valores diurnos. Essa demonstração foi feita, em parte, na simulação laboratorial de vários ambientes com composições bióticas e abióticas semelhantes às verificadas na realidade. O que também contribuiu para a validação dos factores que integram o modelo.

3. Dados do sistema

Nos meios aquáticos do estuário do Mondego,

registou-se regularmente o comportamento de uma série de parâmetros correlacionáveis, sendo referidos os que contribuem para a explicação do modelo:

- Salinidade (%);
- Temperatura (°C);
- Oxigénio Dissolvido (OD em mg/l e concentração em %);
- pH;
- Redox (mV).

Na interpretação global dos dados consideram-se vários indicadores que permitem tirar ilações fundamentais sobre o estado dos sistemas, sobretudo no que diz respeito à Salinidade, ao Oxigénio Dissolvido (OD) e ao pH que se revelam determinantes para uma definição sintética desse estado (ver o exemplo de um dos períodos na Figura 2). As interdependências essenciais revelam que as variações de temperatura, para além das verificadas em situações mais extremadas, têm menor significado, tendo em conta que, na maioria dos locais de monitorização, os valores representados se referem a médias.

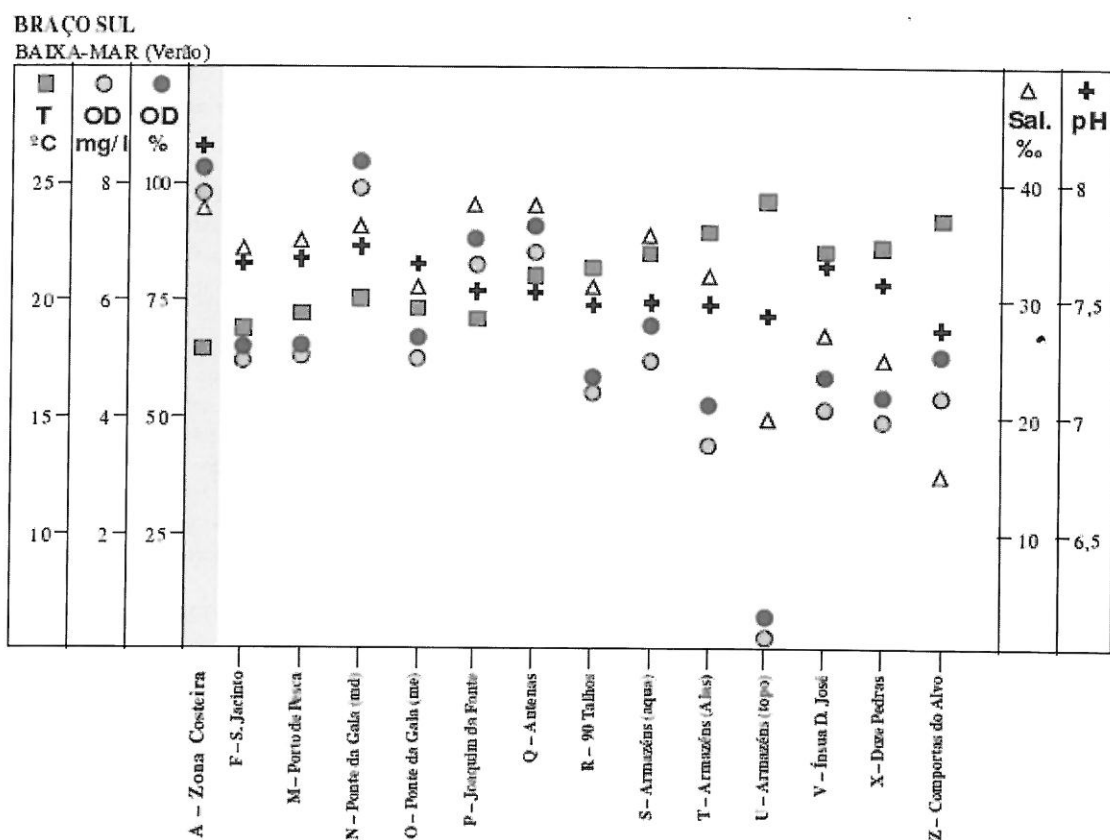


Figura 2

Exemplo de indicadores de ambiente aquático no Braço Sul do estuário do Mondego, considerando as condições médias verificadas nos anos de 2002 e 2003.

Refira-se que alguns resultados podem divergir significativamente de outros estudos efectuados no estuário, sobretudo no que respeita aos registos de pH, bem como a justificação para a ocorrência de certos valores divulgados. Desde logo, porque outros trabalhos de campo terão sido realizados em condições diferentes; mas também porque, no presente trabalho se constata que, quase sempre, os valores elevados de pH e Redox estão relacionados com meios aquáticos menos poluídos, enquanto a ocorrência de degradação ambiental normalmente é acompanhada de acidificação do meio (baixa o pH). O que leva a aceitar que são os processos de degradação da matéria orgânica que mais influem nessas condições

Os dados apontam para a existência de gradientes entre a barra e as zonas mais interiores do estuário, diferenças significativas entre o Braço Norte e o Braço Sul, algumas especificidades entre margens e, também, condições de grande susceptibilidade em muitos esteiros de alimentação das marinhas, servindo de exemplo o Esteiro dos Armazéns na margem esquerda do Braço Sul (verificar exemplo na Figura 2).

São visíveis as principais relações que se estabelecem entre a preia-mar e a baixa-mar quanto aos primeiros quatro parâmetros apresentados. No caso do potencial Redox, os dados não foram conclusivos, com excepção de alguns meios muito reduzidos, pelo que apenas é referido nos testes em ambiente condicionado.

Normalmente, a temperatura sobe para montante, junto às margens e principalmente para o interior dos esteiros. Este sentido pode ser relacionado com outros indicadores importantes sobre o estado de preservação do meio aquático: os valores de pH estão correlacionados com as variações de salinidade e geralmente com as variações de Oxigénio Dissolvido (OD). Regista-se que as áreas mais poluídas e com maior défice de oxigénio têm pH mais reduzido (também há diferenças significativas entre a água salgada e a água doce). Por outro lado, há zonas saturadas de nutrientes que durante o dia aumentam a quantidade de OD, embora o pH continue a ser um indicador do estado de poluição. Observa-se que os distúrbios são mais acentuados em baixa-mar e em zonas com menor hidrodinâmica (como é o caso do esteiro dos Armazéns).

Neste contexto, surge a preocupação sobre a sustentabilidade de algumas actividades e dos próprios ecossistemas que lhe dão razão de existência. Isto porque, antes de tudo, verifica-se que a densidade de explorações aquícolas não pára de aumentar nas localizações mais produtivas, mas também mais poluídas e frágeis.

4. Modelação numérica e gráfica

Assume-se que um estuário da zona temperada atlântica inicia a graduação para montante, a partir do sector marinho (na foz), com a seguinte gama de valores (Pinet, 2000):

- Salinidade: 34 a 37 ‰;
- OD (absoluto): 6,0 a 8,0 mg/l;
- OD (concentração): 80 a 120%;
- pH: 7,9 a 8,3

Inúmeros factores contribuem para variações mais ou menos acentuadas nos intervalos referidos como, por exemplo, a hidrodinâmica flúvio-marinha, a agitação das águas, a radiação solar, ou a pluviosidade.

Como foi referido, a análise de diversos indicadores e factores ambientais, orientou a selecção para parâmetros que se revelam determinantes para a caracterização dos sistemas na transição entre os domínios de água salgada e os de água doce. Por isso, o Modelo que se descreve seguidamente é adequado ao estudo de sistemas estuarinos, das suas áreas intermareais, dos seus reservatórios e dos seus canais, permitindo comparar a evolução temporal e espacial em ambientes com características similares.

4.1. Índice de Qualidade das Águas Estuarinas (IQUAES)

A manipulação dos dados obtidos nas medições em pontos estratégicos do estuário do Mondego possibilitou a construção de um Índice de Qualidade das Águas Estuarinas (IQUAES) que integra três dos parâmetros mais significativos na definição da qualidade da água: Salinidade, Oxigénio Dissolvido (OD) e pH. Diga-se que o termo qualidade não tem aqui um significado redutor, de ser apenas positivo ou negativo, do ser bom ou mau para o ambiente, mas sim uma informação válida sobre o estado global da massa de água estuarina, considerando a sua composição variável e, como já foi assumido, o distanciamento em relação a padrões de fronteira com o meio aquático marinho.

Para efeitos de cálculo do IQUAES, consideram-se sempre valores positivos para todos os factores. Assim, ainda que as medições possam registar o valor "zero" para a Salinidade e o Oxigénio Dissolvido, aceita-se como valores mínimos 1‰ e 0,1 mg/l, respectivamente, para que o índice não venha a ser igual a "zero".

A expressão do IQUAES é, então, a seguinte:

$$IQUAES = \frac{\text{Sal (\%)}}{1000} \times \frac{\text{OD (mg/l)} \times \text{pH}}{2}$$

A flexibilidade do Índice é um dos aspectos mais interessantes do modelo, fazendo com que ele se adapte a diferentes condições de mutação espacial e temporal. De facto, há um Índice 1 de qualidade das águas estuarinas que, não sendo absoluto, aponta para uma relação de coerência entre o índice e o respectivo ambiente aquático, mostrando um ajustamento perfeito nas medições efectuadas em pontos estratégicos do estuário do Mondego (Braço Norte e Braço Sul), em diferentes estações do ano.

As características não estáticas do *IQUAES* evidenciam-se com a necessidade de definir as condições ambientalmente favoráveis do meio aquático, dentro de uma gama de valores considerados normais:

$$\begin{array}{l} \text{O Índice 1 pode variar em} \\ \text{intervalos de valores} \\ \text{não proporcionais} \end{array} \left| \begin{array}{l} \text{Índice 1} = \frac{36}{1000} \times \frac{6,9 \times 8,20}{2} \\ \\ = \frac{0,036}{1} \times \frac{55,76}{2} \\ \\ = 0,036 \times 27,88 = 1 \\ \\ \text{ou} \\ \\ \text{Índice 1} = \frac{35}{1000} \times \frac{7,0 \times 8,17}{2} \\ \\ \text{Índice 1} = 0,035 \times 28,595 = 1 \end{array} \right.$$

O grau de afastamento de valores inferiores ao Índice 1 sugere a gradual evolução para meios de água doce, forte precipitação ou descargas de barragens, ou ainda a existência de problemas ambientais que serão confirmados na interpretação dos dados das diversas medições das águas estuarinas. O desvio para valores superiores a 1,0 indica, normalmente, a prevalência de ambiente marinho, com maior ou menor agitação e produtividade biológica.

Como as expressões matemáticas obtidas nem sempre exprimem relações directas de causalidade, concebeu-se a componente geométrica do modelo que permite a interpretação gráfica complementar dos dados e que é indissociável da expressão anterior.

4.2. Triângulo de Qualidade das Águas Estuarinas (*TRIQUAES*)

O *TRIQUAES* relaciona integralmente os parâmetros do *IQUAES*. Está construído com intervalos de valores que são susceptíveis de serem registados em estuários dinâmica e biologicamente activos. O que significa que os extremos já são críticos ou excepcionais no meio ambiente. O *TRIQUAES* tem algumas propriedades e características que proporcionam uma leitura facilitada da informação:

1. É um triângulo equilátero, graduado de forma proporcional em relação a cada um dos factores.

2. A graduação faz-se no sentido contrário aos ponteiros do relógio e a leitura paralelamente ao lado contíguo posterior.

3. Por comodidade na leitura dos dados, o *TRIQUAES* contém uma grelha interior com 45 vértices e 64 triângulos hipotéticos, sendo 36 direitos e 28 invertidos (Figura 3). Podem fazer-se outras divisões como, por exemplo, 16 triângulos (10 direitos e 6 invertidos), ou 4 triângulos (3 direitos e um invertido).

4. Na base regista-se o valor da Salinidade, o parâmetro com maior variabilidade, diária e sazonal. No entanto, a linha horizontal de qualquer triângulo corresponde ao valor do pH.

5. As variações da Salinidade e do Oxigénio Dissolvido definem a amplitude lateral dos triângulos e atribuem, também, a qualidade de triângulo direito ou de triângulo invertido. A variação do valor de pH define a amplitude vertical dos triângulos.

6. A dimensão e a forma dos triângulos (direitos ou invertidos) estão intimamente relacionados com o *IQUAES*, embora haja uma margem de variabilidade. Dão indicação visual imediata sobre o estado do sistema. A inversão do triângulo pode estar relacionada com a influência predominante de meios de água doce e/ou por haver degradação ambiental.

7. A qualidade de triângulo direito ou de triângulo invertido mantém-se, rodando o *TRIQUAES* para qualquer posição.

8. O Índice 1 representa tendencialmente uma posição de equilíbrio ambiental e o respectivo triângulo deve situar-se dentro da área global do *TRIQUAES*. A posição do Índice 1 é relativamente variável dentro do triângulo de referência (Figura 4). Por exemplo, um triângulo com valor próximo do 1 absoluto tem as coordenadas: pH=8,17; Sal.=35; OD=7.

9. Os pontos de transição (próximos do índice 0,50) têm significado crítico. A posição do ponto ou área de transição evidencia a influência determinante de um (ou dois) dos três factores considerados.

10. O ponto de Índice 0,5 não tem uma centralidade geométrica. O ponto 0,5 mais próximo do centro geométrico corresponde ao vértice: pH=8; Sal.=25; OD=5 (Figura 5).

11. Tendencialmente, os triângulos invertidos com valores próximos do índice 0,5 têm pequena dimensão e aproximam-se da área central e do Ponto de Transição. Quanto maior é o afastamento a este ponto, maior será o desvio em relação a condições normais. Daí a designação de grelha de triângulos hipotéticos, dado que o índice 0,5 pode não corresponder a uma zona de inversão normal dos triângulos.

12. Observam-se as seguintes expressões no *IQUAES* devido a mudanças de posição dos triângulos (*TRIQUAES*):

– O aumento do tamanho dos triângulos direitos traduz a subida do *IQUAES*. Os triângulos posicionados mais ao centro aumentam mais o valor do índice em termos absolutos;

– O aumento do tamanho dos triângulos invertidos traduz a descida do *IQUAES*;

– As posições dos triângulos direitos e dos triângulos invertidos mostram que, com a mesma dimensão, o *IQUAES* aumenta de valor para posições superiores e diminui de valor para posições inferiores e, também (em menor medida), para posições à esquerda e à direita (Figuras 6A e 6B).

13. A análise mais cuidada mostra que, em qualquer das situações representadas (triângulos direitos ou invertidos), o valor da subida do *IQUAES* é proporcional ao valor da descida do *IQUAES*, com desvios geométricos idênticos (para cima e para baixo). Também os desvios laterais têm valores idênticos, à esquerda e à direita, embora com menores variações absolutas na descida do *IQUAES*.

14. A posição relativa dos triângulos indica o(s) parâmetro(s) mais determinante(s) da condição positiva ou negativa do sistema ou local analisado:

- As posições centrais pressupõem comportamento equilibrado, de interdependência, entre os três parâmetros;

- Em princípio, os triângulos direitos, com posição central, no interior do *TRIQUAES* e mais próximos das margens exteriores, representam ambientes ecologicamente em bom estado;

- Os triângulos invertidos representam, normalmente, um afastamento em relação às condições ideais do meio aquático estuarino de carácter mais marinho;

- Os triângulos direitos ou invertidos que excedem as margens do triângulo base estão, em grande medida, condicionados por valores anormalmente elevados de um dos factores (Figura 7). Além disso:

- Quando um triângulo está invertido à esquerda isso significa, normalmente, forte influência de água doce fluvial;

- Quando um triângulo está invertido à direita, isso significa, normalmente, défice de Oxigénio Dissolvido (OD);

- Apenas em condições muito excepcionais poderá haver um triângulo invertido dentro da área superior do triângulo de referência. De qualquer modo, em condições normais, o triângulo invertido aumenta de dimensão com a diminuição do pH.

15. O *IQUAES* sobe com a subida de todos os parâmetros e daí resultam triângulos direitos e de maiores dimensões.

16. Os dois parâmetros que mais influenciam o *IQUAES* são o Oxigénio Dissolvido (OD) e a Salinidade porque são os que têm maior variação de valor

absoluto. O *IQUAES* é, pois, mais sensível às variações de Oxigénio Dissolvido e de Salinidade do que às variações do pH.

17. Daí que, fazendo a leitura do *IQUAES* através dos pontos de vértice (Figura 5), pode constatar-se que:

- Mantendo o valor da Salinidade, o índice sobe com a subida do Oxigénio Dissolvido e a descida do pH;

- Mantendo o valor do Oxigénio Dissolvido (OD), o índice sobe com a subida da Salinidade e a descida do pH;

- Mantendo o valor do pH, o *IQUAES* sobe com a subida da Salinidade e a descida do Oxigénio Dissolvido, na 1ª metade do eixo; e o *IQUAES* desce com a subida da Salinidade e descida do Oxigénio Dissolvido, na 2ª metade do eixo.

18. Quanto à expressão bidimensional do *IQUAES*, temos as seguintes relações:

a) A influência no *IQUAES* da variação de um dos parâmetros, mantendo os outros dois com valores adequados a um estuário marinho, mostra que:

- Em todos há variação equivalente;

- A Salinidade e o OD mimetizam-se;

- A evolução do pH é menos pronunciada, não tendo valores inferiores a 0,50.

b) A influência no *IQUAES* da variação de dois dos parâmetros, mantendo o terceiro com valor adequado a um estuário marinho, mostra que:

- Em todos há variação progressiva;

- O pH é mais sensível à subida dos outros dois factores;

- A Salinidade e o OD mimetizam-se quando relacionados com a evolução conjunta dos outros dois parâmetros. São menos sensíveis à evolução para valores elevados dos outros dois parâmetros em conjunto.

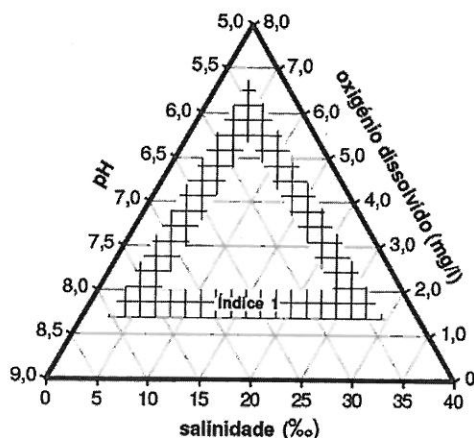


Figura 3

Grelha básica hipotética do *TRIQUAES*.

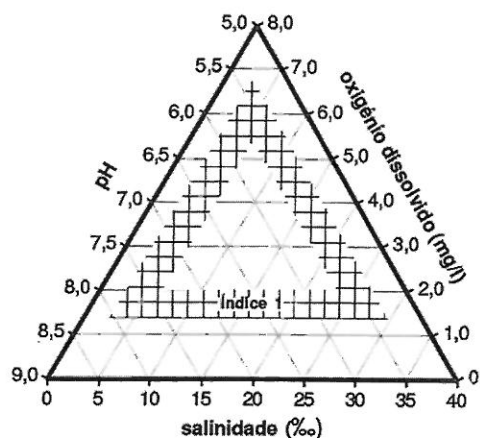


Figura 4

Variabilidade da posição (não proporcional) do índice 1 dentro do TRIQUAES,

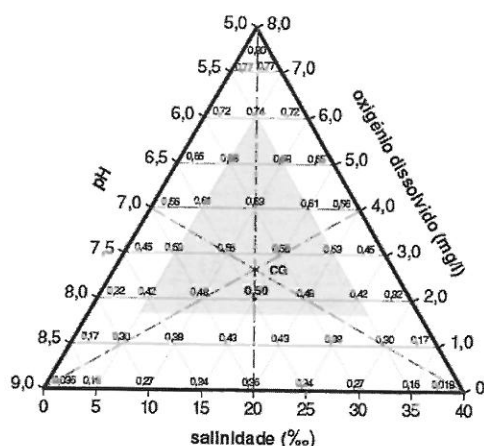


Figura 5

Valor dos índices nos vértices da grelha do TRIQUAES e Centro Geométrico (CG), Ponto de Transição (0,50) e triângulo do índice 1 (a cinzento).

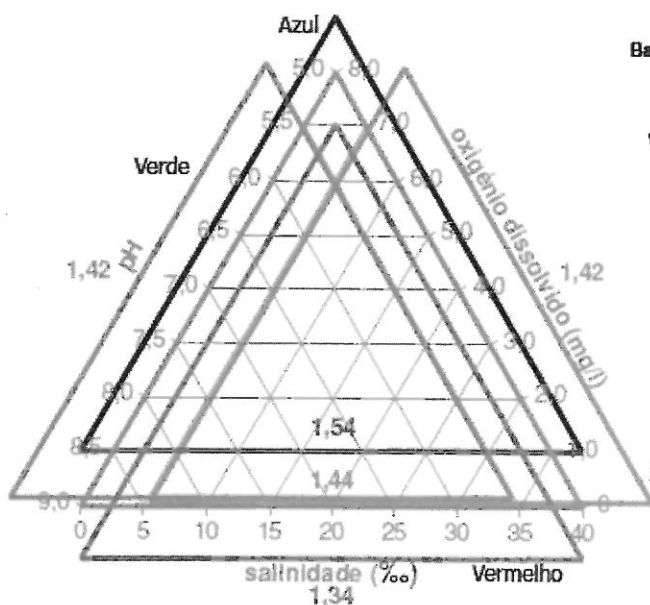


Figura 6A

Valores do IQUAES em triângulos invertidos, mantendo a dimensão do TRIQUAES, mas desviando a sua posição.

$$\text{Branco (cinza)} = \frac{40}{1000} \times \frac{8,0 \times 9,0}{2} = 1,44$$

$$\text{Vermelho} = \frac{37,5}{1000} \times \frac{7,5 \times 8,5}{2} = 1,34$$

$$\text{Azul} = \frac{42,5}{1000} \times \frac{8,5 \times 8,5}{2} = 1,54$$

$$\text{Verde} = \frac{35}{1000} \times \frac{8,0 \times 8,0}{2} = 1,42$$

$$\text{Amarelo} = \frac{45}{1000} \times \frac{7,0 \times 9,0}{2} = 1,42$$

Amarelo

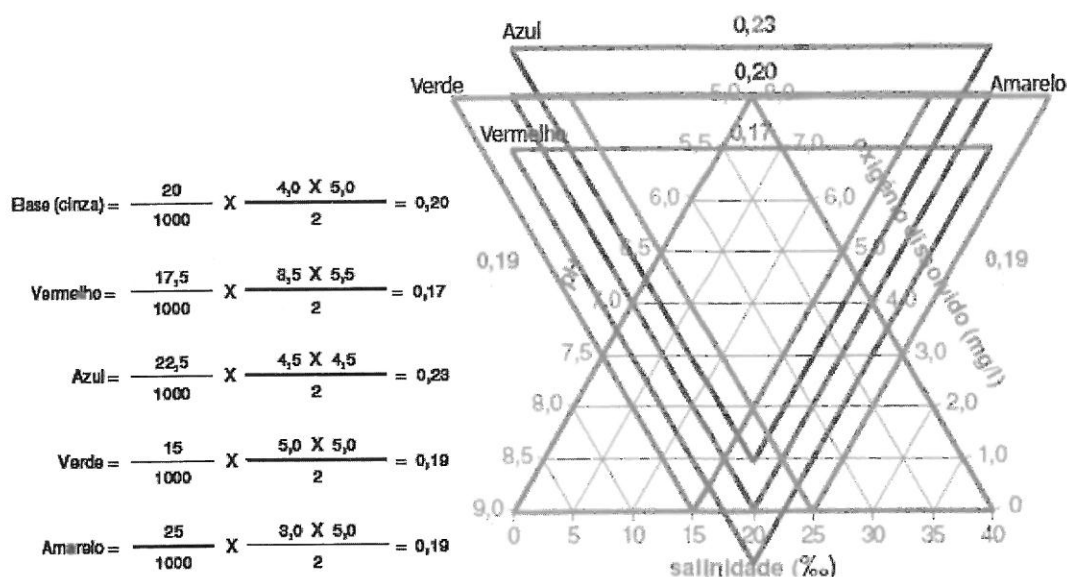


Figura 6B

Valores do IQUAES em triângulos invertidos, mantendo a dimensão do TRIQUAES, mas desviando a sua posição.

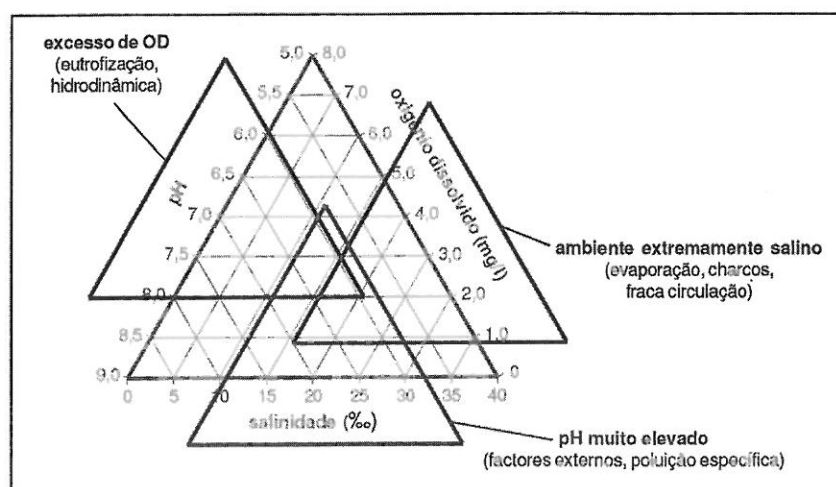


Figura 7

Factores condicionantes do desvio do TRIQUAES para fora do triângulo base (a dimensão idêntica dos triângulos serve apenas para facilitar a leitura).

5. Experiências laboratoriais

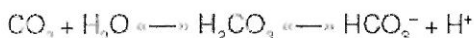
No ambiente aquático estuarino há uma grande diversidade de condicionantes locais, temporais e eventuais que, conjugadas, podem criar dificuldades à leitura e interpretação dos dados. Talvez por isso, haja alguma dissonância nos resultados que são divul-

gados em estudos que abordam esta matéria (e. g. CONSULMAR *et al.*, 1991; CUNHA *et al.*, 1997; PARDAL & MARQUES, 1998; LILLEBO *et al.*, 2002), podendo levar a conclusões incompletas sobre o significado de certas alterações físico-químicas. Por exemplo, é comum a afirmação de que, no estuário, "quando o pH é elevado, isso é sinal de ambiente poluído". Ora, nada

indica que tenha que ser assim. Pelo contrário, um ambiente salino tem um pH mais elevado do que o neutro e quando o pH desce, isso sim, é sinal de degradação do meio aquático, normalmente por processos bioquímicos.

Pode haver algumas diferenças ou contradições motivadas pela composição do fluxo fluvial, ou pelo momento em que se faz a medição. Daí que a indicação de um valor para qualquer dos parâmetros do IQUAES (Salinidade, OD e pH) deve ser completado com o local de medição, a estação do ano, o estado de tempo, o momento mareal e a hora da medição, dada a variabilidade que pode ocorrer ao longo do dia e, sobretudo, entre o dia e a noite.

Note-se que, durante a noite, quando há mais produção e libertação de CO₂, o meio aquático não fica com pH mais elevado, mas sim mais baixo. Como se sabe, a reacção reversível, própria dos seres vivos, é a seguinte:



Ainda que seja impraticável a reprodução de condições reais em ambiente condicionado, para mais em volumes muito limitados, algumas experiências

laboratoriais permitiram registar o comportamento de uma série de parâmetros fundamentais, em condições de stress acentuado e progressiva degradação dos meios aquáticos (induzida, também, por estímulos externos). Assim, foi possível acompanhar a evolução de complexas reacções bio-físico-químicas que se exprimam nos parâmetros-alvo deste trabalho.

Numa das experiências, procedeu-se ao registo da evolução dos parâmetros do IQUAES em dois meios distintos, um de água doce e outro de água salgada. No primeiro, considera-se a salinidade mínima de 1‰ e, em ambos, o OD mínimo não pode ser inferior a 0,1 mg/l. Esta tarefa foi realizada em períodos de um mês e teve por objectivo mostrar comportamentos diferenciados dos dois meios aquáticos em condições de grande instabilidade. No exemplo apresentado, ambos estão povoados com algumas plantas típicas de cada um deles: no aquário de água doce foram colocados alguns exemplares de *Myriophyllum aquaticum* e *Lemna gibba*, além de um pequeno *Nymphae alba*; o aquário de água salgada recebeu *Pelvetia canaliculata*, *Cladophora rupestris* e *Ulva rigida* (um exemplar de cada). Esta primeira experiência foi conceptualmente importante porque mostrou que (Figura 8):

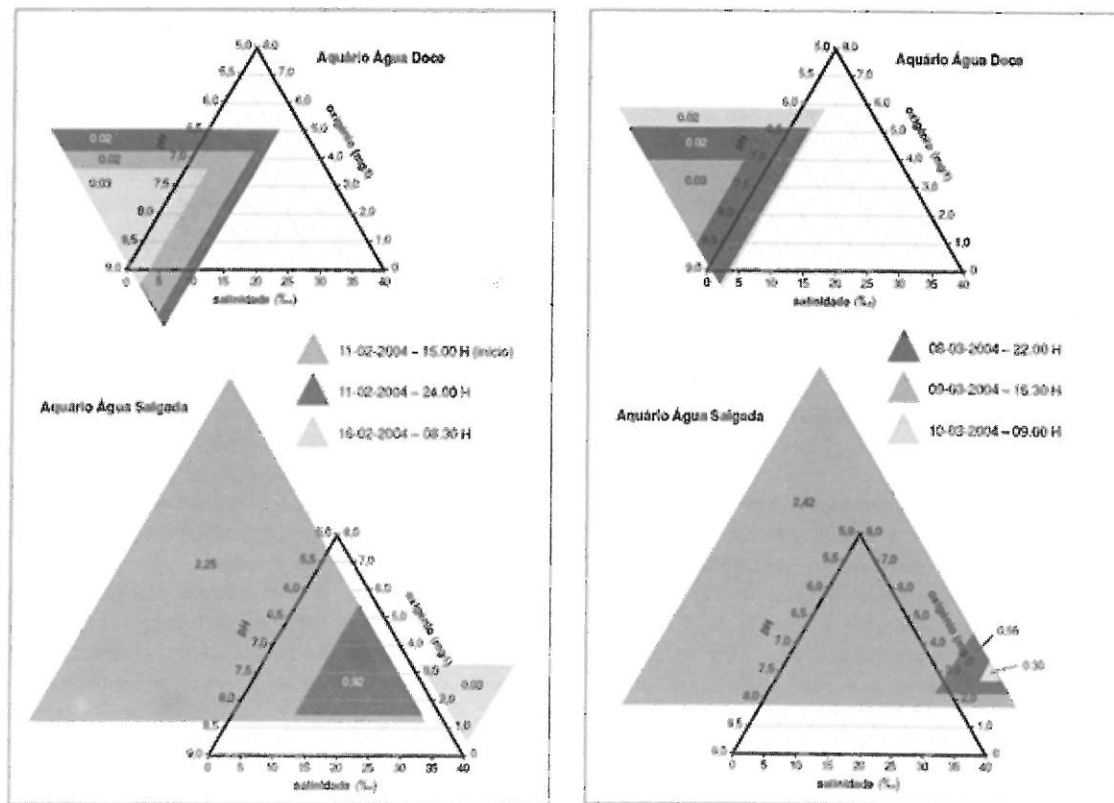


Figura 8

Evolução dos indicadores de qualidade da água e do IQUAES nos primeiros registos (esquerda) e passado um mês (direita) em cada um dos meios (água doce e água salgada).

- Apesar do volume muito limitado e de haver grandes amplitudes térmicas diárias, não se registaram variações drásticas dos parâmetros do meio de água doce, provavelmente devido às características da vegetação ali incluída (maioritariamente, plantas aquáticas de superfície com raízes);

- Pelo contrário, verificou-se que o meio de água salgada mostrou rapidamente tendência para a ruptura, não somente pela subida da salinidade (49 ‰ no final), mas pela instabilidade e variações bruscas do OD e do pH entre o dia e a noite. Neste caso, a vegetação aquática é constituída por algas que respiram e libertam oxigénio e CO₂, influenciando mais profundamente o meio;

- Naturalmente, o *TRIQUAES* da água doce está encostado à esquerda e é invertido, enquanto o *TRIQUAES* da água salgada é mais abrangente e direito;

- A dimensão dos triângulos mostra bem o estado momentâneo de ambos os ambientes. O aumento da dimensão de um triângulo invertido significa agravamento das condições ambientais; enquanto o aumento da dimensão de um triângulo direito, para cima do índice 1, significa desequilíbrio de um ou mais factores do *IQUAES*, normalmente num ambiente eutrofizado, bem evidenciado pela redução acentuada do tamanho do triângulo em período nocturno;

- Estes comportamentos estão intimamente relacionados com vários factores, nem sempre de leitura fácil e directa. Por exemplo, são as variações diárias da luz e exposição solar que fazem variar o OD e, consequentemente o pH, enquanto a temperatura tem alguma correlação com o OD apenas porque a intensidade luminosa leva ao forte aquecimento da água no período de grande produção de oxigénio pelo fitoplâncton e pelas algas. Até porque, por si só, o aumento da temperatura levaria à queda do OD.

6. Resultados nos sistemas aquáticos do estuário do Mondego

Os dados seleccionados para servirem de exemplo à aplicação do *IQUAES* referem-se ao ano de 2003, no Verão e no Inverno, em período diurno, representando medições efectuadas nas 25 estações de monitorização, contando a estação de S. Jacinto (na confluência dos braços) a dobrar, uma vez que os momentos de medição nos dois subsistemas (Braço Norte e Braço Sul) não coincidiram.

Para facilitar a análise, estes primeiros Blocos de informação estão aqui agrupados em 12 sectores espacialmente significativos, a partir dos quais se procedeu à análise gráfica do *IQUAES* (construindo os respectivos *TRIQUAES*). No entanto, deve ter-se em

conta que as médias estatísticas esbatem algumas diferenças das escalas de abordagem superiores.

A interpretação integrada dos dados é efectuada Sector a Sector, nas condições que permitem obter informação mais significativa:

- Em cada um dos subsistemas (Braço Norte e Braço Sul);

- No Verão e no Inverno;

- Em preia-mar e em baixa-mar (ambas em marés-vivas).

Deste processo, resultaram 48 gráficos, cuja interpretação de resultados fica fora deste texto, mas da qual se apresenta uma visão agregada.

Assim, salvaguardando os efeitos mitigadores que a agregação suplementar de dados produz, pode ser feita uma análise global, muito sumária, dos dois subsistemas (Figura 9) que leva a concluir que o *IQUAES* e o *TRIQUAES* evidenciam diferenças entre os Braço Norte e Braço Sul do Mondego, com destaque para:

- O Braço Sul está mais desviado à direita, o que significa maior grau de salinidade;

- Em baixa-mar, o Braço Sul tem o *IQUAES* mais reduzido, normalmente devido a baixo conteúdo de OD e baixo pH. Em termos gerais, a situação é grave no verão com os indicadores a apontarem para a existência de problemas ambientais profundos;

- No Verão, o Braço Norte mostra possuir um ambiente aquático mais equilibrado, devido à boa penetração da maré;

- Logicamente, o maior afastamento a condições ideais ocorre no Braço Norte, em baixa-mar, no Inverno, devido ao forte caudal fluvial que provoca acentuada queda da salinidade.

Podemos dizer, então, feitas as demonstrações anteriores, que a análise integrada do *IQUAES* e do *TRIQUAES*:

- Tem significado absoluto;
- Tem significado relativo;
- Mostra evolução no tempo;
- Evidencia diferenças espaciais no mesmo sistema;
- Serve para comparar diferentes locais e sistemas;
- Enquadra-se bem no ambiente aquático estuarino e nas suas mutações constantes.

Finalmente, é interessante verificar de que forma funciona o índice na distribuição espacial dos valores que foram sendo calculados, perspectivando a construção de um modelo dinâmico de influências.

7. Análise espacial (*ISIDROCALIA*) e conclusões

O estudo realizado em marés-vivas de Verão e Inverno, com resultados expressos no *IQUAES* e no

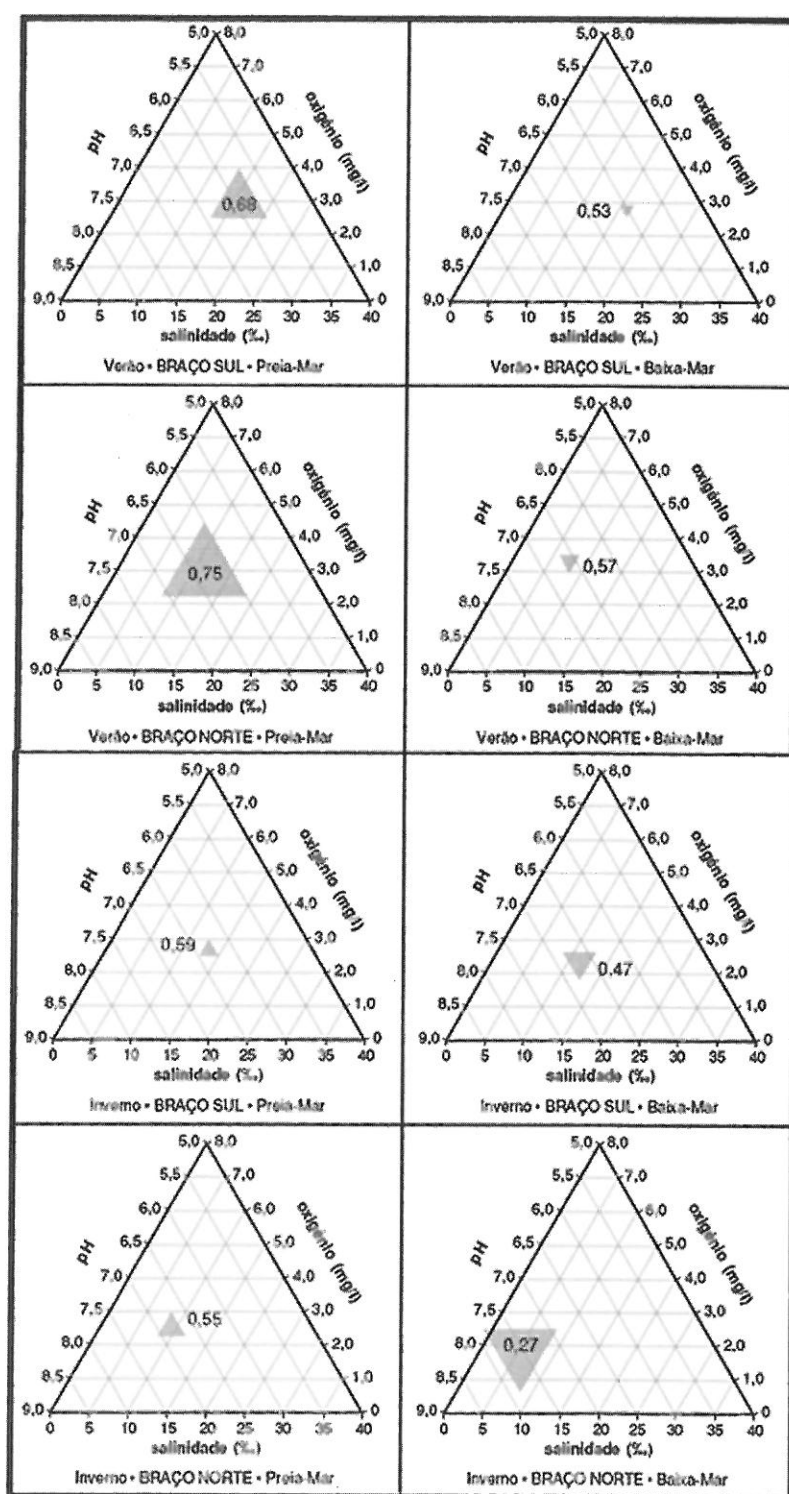


Figura 9

Definição da área, forma e posição do TRIQUAES, considerando os parâmetros que integram o IQUAES, no Verão e no Inverno, em marés-vivas, nos Braços Sul e Norte do Mondego.

TRIQUAES, aponta para que uma parte significativa do meio aquático estuarino tenha condições ambientais difíceis e, nalguns casos, muito preocupantes. O Subsistema do Braço Sul, frequentemente indicado como aquele que estaria em melhor estado de conservação, sofre pressões, episódios de *stress* e impactes continuados que põem em causa algumas ideias instaladas e aconselham a identificar zonas de risco, enumerar causas de distúrbio e definir medidas correctivas adequadas.

Em variadas condições, os procedimentos do *IQUAES* e do *TRIQUAES* permitem avaliar o grau de interpenetração das águas marinhas, estuarinas e fluviais, dando indicações fiáveis sobre as condições ambientais dos sistemas, sem prejuízo de análises mais específicas de certos troços e sectores.

O interesse maior deste trabalho é que, reconhecendo a importância da localização das fronteiras e transições entre os meios aquáticos salgado-salobro-doce, logicamente identificados pelo grau de salinidade, avança para a delimitação espacial do estado dos diferentes meios aquáticos em diferentes sistemas ou dentro do mesmo sistema, pois é isso que de facto está em causa quando falamos de sustentabilidade no uso e ocupação do território, na exploração dos recursos naturais e na identificação de impactes ambientais.

Sendo o ambiente aquático estuarino mutável e deslocável com as marés e outros fluxos flúvio-marinhos, podemos acompanhar o seu movimento para montante ou para o exterior oceânico, onde, por exemplo, o sector junto à barra registou *IQUAES* variável, ainda que esteja sob o domínio da água oceânica. Quer isso dizer que há sempre uma zona de fronteira mais ou menos afastada da foz de um rio.

Podemos, assim, registar a retracção ou a projecção de certas características do estuário dentro do mar, tal como ocorre para montante, no rio. Um movimento de massa de água que possui determinadas características, impulsos internos e graduações mais ou menos acentuadas para os extremos territoriais.

Uma forma de delimitar espacialmente essas diferenças dentro da massa de água estuarina é o uso do *IQUAES*. As medições em pontos e momentos definidos previamente permitem desenhar os primeiros esboços de linhas que unem pontos com idêntico *IQUAES* a uma determinada profundidade. Essas isolinhas poderão designar-se de *ISIDROCÁLICAS*, termo que resulta da conjugação de palavras de origem grega com o significado de "linhas que unem pontos com igual qualidade da água", havendo, então, planos aquáticos com *isidrocalia*. Além disso, a distinção do plano de profundidade a que se referem terá a sua indicação entre parêntesis: *ISIDROCÁLICA(0)*; *ISIDROCÁLICA(1)*; *ISIDROCÁLICA(2)*..., consoante digam

respeito, respectivamente, à isidrocalia da superfície (0 m), ou a profundidades de 1 metro, 2 metros, (...).

Como a mesma *ISIDROCÁLICA* pode conter diferentes composições dos parâmetros do *IQUAES*, tendo em conta algumas variações específicas, é conveniente analisar o *TRIQUAES* das estações de monitorização, além de poderem fazer-se correlações com Isohalinas e outras isolinhas significativas.

Os primeiros esboços das *ISIDROCÁLICAS(0)* para o conjunto do estuário do Mondego (Figuras 10A a 10D) referem as condições de qualidade do meio aquático em marés-vivas, no Verão e no Inverno, em período diurno. Futuramente, há todo o interesse em aumentar o número de estações de monitorização e registar a distribuição das *ISIDROCÁLICAS* no período nocturno (principalmente entre as 00H00 e as 06H00) e noutros planos de profundidade que permitam comparar oscilações diárias e fazer análises tridi-mensionais deveras importantes para acompanhar o estado das zonas com reduzida hidrodinâmica, a evolução de corpos vasosos, a influência de cunhas salinas, ou de plumas de poluição.

Note-se que a distribuição espacial de *ISIDROCÁLICAS* apresentada em cada uma das figuras é meramente indicativa, dados os inúmeros factores que as condicionam, como:

- Luz e fotoperíodo;
- Pluviosidade;
- Fluxo fluvial;
- Drenagens marginais;
- Correntes marítimas;
- Vento e ondulação;
- Refracção marítima (morfologia costeira e obstáculos artificiais);
- Batimetria, forma e composição do fundo;
- Efluentes urbanos e industriais (de superfície e imersos);
- Descargas de comportas dos campos agrícolas;
- Dragagens e outros distúrbios da coluna de água.

A análise comparada das Figuras 10A a 10D com a Figura 9 leva-nos a confirmar algumas das conclusões a que havíamos chegado no confronto numérico e gráfico respectivamente do *IQUAES* e do *TRIQUAES*:

- No Verão, em preia-mar, as *ISIDROCÁLICAS* respondem ao movimento da enchente, sobretudo no Braço Norte e, mais concretamente, na sua margem esquerda. O Braço Sul mostra condicionamentos nos troços proximais junto à Quinta do Canal, no esteiro dos Armazéns e uma certa afectação intermédia que se deve a mistura com águas residuais dos inúmeros canais e bancos que aí existem. Por seu lado, no sector mais aberto e livre do Braço Sul as condições do ambiente aquático melhoram pronunciadamente.

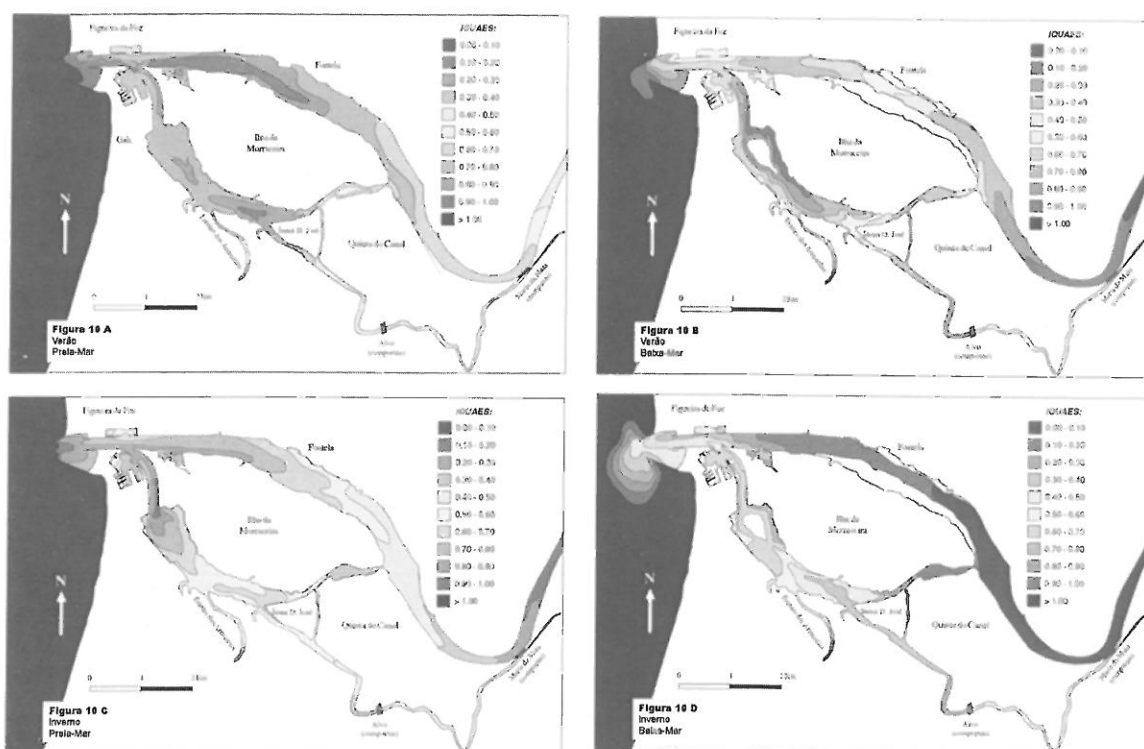


Figura 10

Esboço da distribuição espacial de Isidrocalicas(0) e do Índice de Qualidade das Águas Estuarinas (IQAES) no estuário do Mondego

• No Verão, em baixa-mar, observa-se que as *ISIDROCÁLICAS* também respondem aos fluxos da vazante, igualmente com maior incidência no Braço Norte. As condições alteram-se relativamente à preia-mar, pois agora a água doce flui livremente à superfície, sendo sobretudo a baixa salinidade a responsável pela queda do IQAES. Já no Braço Sul, os constrangimentos têm a ver não só com descidas bruscas da salinidade, mas, também, com a maior exposição a impactes antrópicos (agricultura, indústria e esgotos domésticos), além da topografia muito irregular, da colmatção e do atulhamento de alguns sectores que aí retêm as águas poluídas. As descargas das pisciculturas da margem direita (ilha da Morrastre) podem melhorar momentaneamente o índice porque aumentam a circulação e a agitação das águas numa área pouco profunda, fazendo subir o OD. Mas isso agrava a situação de outros sectores, hidrodinâmica cria condições anaeróbias e ambientes impróprios para a maioria das espécies aquáticas, acumulando produtos tóxicos nos substratos que acabam por afectar actividades tradicionais como a salinicultura.

• No Inverno, em preia-mar, há uma sequência mais marcada das *ISIDROCÁLICAS*, quer no Braço Norte

quer no Braço Sul, porque existe mais água doce superficial (nesta altura, há maior fluxo fluvial e os leitos transbordam). É também mais evidente à superfície o efeito de Coriolis que conduz a enchente pelas margens esquerdas.

• No Inverno, em baixa-mar, o Braço Norte é dominado pelo fluxo do Mondego, enquanto o Braço Sul apenas recebe água doce através das descargas das comportas do Alvo e drenagens das valas e canais marginais. As *ISIDROCÁLICAS* definem bem a força do escoamento fluvial no Braço Norte que cria uma pluma salobra para o interior do oceano, a qual pode progredir para norte ou para sul, consoante as condições atmosféricas (direcção do vento) e da agitação marítima. Em períodos de forte pluviosidade, a água doce flui mais facilmente na bifurcação de Cinco Irmãos e faz baixar o IQAES nesse troço proximal do Braço Sul. Assinale-se que as *ISIDROCÁLICAS* também mostram o comportamento lagunar do Braço Sul, possibilitando a existência de uma mancha com IQAES entre 0,60 e 0,80 capaz de mobilizar a produção de biomassa estuarina e de manter muitas espécies aquáticas que sustentam a numerosa avifauna e a intensa exploração humana (Fotografia 1).

Estes resultados e conclusões estão em linha com alguns estudos da ecologia do estuário do Mondego (e.g.,



Fotografia 1

Apanha de bivalves e outros bentos. em baixa-mar. no Braço Sul do Mondego.

MARQUES *et al.*, 2002), quanto às tendências associadas a alguns parâmetros que distinguem o Braço Sul do Braço Norte (sobretudo, a salinidade, o OD, e efeitos da presença de nitratos). Mas o presente modelo permite evidenciar zonas de fragilidade e sectores em risco de colapso, com impacto na sustentabilidade de ambos os subsistemas, incluindo a rede de esteiros de abastecimento e drenagem das marinhas.

Deve dizer-se que os valores obtidos nos parâmetros do modelo, resultando de medições em período diurno, acabam por não exprimir totalmente os picos esperados (sobretudo de OD) nos troços mais calmos e sujeitos a processos de eutrofização. Provavelmente, isso deveu-se ao facto de uma parte significativa dos registos ter sido efectuada no período da manhã, quando ainda não havia expressão acentuada da produção de oxigénio pelos produtores primários. Além disso, tudo indica que a turbidez tem um papel importante nos valores obtidos, uma vez que limita muito a penetração da luz solar no meio aquático. Seja como for, considerando que a concentração de OD frequentemente não se adequa aos níveis de bem-estar biológico (tabelas de SWENSON, 2004)), será útil que, futuramente, em trabalhos de aplicação do modelo, se contemple a medição de parâmetros em três períodos essenciais: manhã (alvorada), tarde (picos da luz e da temperatura) e noite (24H00). As experiências realizadas no âmbito deste projecto assim o sugerem.

Referências bibliográficas

- ACABADO, G. (1998) - "Aproveitamento hidráulico do Mondego. Situação actual. Impactes ambientais. Modelos de gestão". *Revista Sociedade e Território*, nº 27, pp. 106-121.
- BONDS, C. (1996) - *Biology of Fishes*. Saunders, 2.nd edition, pp. 599-605.
- CARMO, J. (2004) - *Modelação em Hidráulica Fluvial e Ambiente*. Imprensa da Universidade de Coimbra, 358 p.
- CONSULMAR, Hidroprojecto, Hidroquatro (1991) *Regularização da Zona Estuarina de Transição entre o Porto da Figueira da Foz e o troço terminal de regularização do Baixo Mondego (Estudo de Impacte Ambiental)*. Direcção-Geral de Portos, Lisboa.
- CUNHA, P.; DINIS, J. e REIS, R. (1997) - *Avaliação das modificações antrópicas actuais nos sub-ambientes sedimentares do Estuário do Mondego*. Projecto PEAM/C/243/93. Instituto do Mar e Departamento de Ciências da Terra da F.C.T.U.C., Coimbra, 152 p.
- CUNHA, P. e DINIS, J. (2002) - "Sedimentary Dynamics of the Mondego Estuary". *Aquatic Ecology of the Mondego River Basin. Global importance of local experience*. Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra, pp. 43-62.
- GREEN, E. e GARRIT, D. (1967) - "New tables for oxygen saturation of seawater". *Journal of Marine Research*, 25, pp. 140-147.

- LILEBBO, A.; FLINDT, M.; PARDAL, M.; MARTINS, I.; NETO, J. e MARQUES, J. (2002) - "Nutrient Dynamics in the Intertidal Pools of the Mondego Estuary. II. Seasonal efflux of $\text{PO}_4\text{-P}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$ in bare bottom and vegetated pools". *Aquatic Ecology of the Mondego River Basin. Global importance of local experience*. Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra, pp. 257-271.
- PARDAL, M. e MARQUES, J. (1998) - "Impacto das actividades humanas na qualidade ecológica do Estuário do Mondego. Possíveis soluções para o futuro". *Revista Sociedade e Território*, nº 27, pp. 62-70.
- PINET, P. (2000) - *Invitation to Oceanography* (Second Edition). Jones and Bartlett Publishers, Inc., USA, 540 p.
- PINHO, J.; VIEIRA, J. e CARMO, J. (2001) - "Hydrodynamics and Water Quality Studies in Ria de Arosa Applying Mathematical Modelling". *Océanos III Milénio, I Congresso Internacional de Ciencia y Tecnología Marina*. Pontevedra, pp. 275-283.
- POUCHEN, S.; KEATING, J.; KUBENA, K. e FISH, T. (2004) - "Guidance for Implementation of the Saltwater Dissolved Oxygen Criteria". *EMAP Symposium*. Newport, RI, 26 p.
- RIBEIRO, J. L. (2001) - *Zonas húmidas costeiras e ordenamento territorial. O caso do estuário do Mondego*. Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra, 326 p.
- RIBEIRO, J. L. (2002) - "Conflicts in the Mondego estuary: sustainability of natural resources and of traditional land use". *The Changing Coast, Littoral 2002, 6th International Symposium*. Eurocoast/EUCC, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Vol. III, pp. 111-115.
- RIBEIRO, J. L. (2006) - "Interpenetração entre os meios marinho e doce no estuário do Mondego: circulação dominante, impactes ambientais e conflitos sectoriais". *Colóquio As Ciências da Terra ao serviço do ensino e do desenvolvimento. O exemplo da Figueira da Foz*. Departamento de Ciências da Terra da FCTUC e Kiwanis Clube da Figueira da Foz, pp. 95-108.
- SWENSON, H. (2004) - "Oxygen & other dissolved gases in saltwater". *US Geological Publication*. Washington.
- WEISS, R. (1970) - "The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater". *Deep-Sea Research*, 17, pp. 721-735.
- WETZEL, R. (1993) - *Limnologia*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 919 p.