

ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DE UM MODELO ECOLÓGICO PARA A ALBUFEIRA DE CRESTUMA-LEVER

Bruno Azevedo

Investigador

CEMAS – UFP

bazevedo@ufp.pt

Pedro Duarte

Professor Titular

CEMAS, Faculdade de Ciência e Tecnologia – UFP

pduarte@ufp.pt

Adriano A. Bordalo

Professor Associado com agregação

ICBAS - Universidade do Porto / CIIMAR

bordalo@icbas.up.pt

A Directiva Quadro da Água coloca uma série de desafios novos à gestão dos recursos hídricos. Estes desafios poderão implicar a utilização de modelos matemáticos que permitam antecipar os efeitos das acções antropogénicas sobre as águas superficiais. Este trabalho tem como principal objectivo apresentar um modelo ecológico da barragem de Crestuma-Lever e os resultados dos primeiros testes efectuados com o mesmo. O modelo foi desenvolvido no âmbito de um dos projectos em que participa o CIIMAR e a Universidade Fernando Pessoa e espera-se que possa vir a ser utilizado como uma ferramenta útil na gestão da barragem de Crestuma-Lever.

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural com características muito especiais. Indispensável ao homem e aos outros seres vivos, é componente privilegiado da própria vida e suporte essencial dos ecossistemas. A água está distribuída no espaço e no tempo de forma heterogénea em muitas regiões do globo, como em Portugal. As cheias e as secas são manifestações extremas desta heterogeneidade e, embora entre nós não existam quantificações precisas dos prejuízos ocasionados por cheias e secas, há a consciência de que estes são relevantes.

Os problemas dos recursos hídricos são ainda agravados pelas situações difíceis e muitas vezes litigiosas que se verificam entre diversos países, no que diz respeito à utilização partilhada das bacias internacionais. No caso de Portugal, este problema é crucial, dado que mais de metade dos recursos hídricos superficiais disponíveis no nosso território provém de Espanha, sem que estejam devidamente acautelados para o futuro os interesses nacionais relativamente à utilização destes recursos (Garcia, 2004).

Uma das causas de alteração da qualidade das águas é o seccionamento dos rios através da construção de barragens. Estas, apesar de todos os benefícios associados, tais como o armazenamento de água, a prevenção das cheias e a produção de energia eléctrica, também acarretam custos ambientais importantes. Sendo estruturas desenhadas para armazenar ou desviar água, alteram os regimes de caudal de modo a atender às necessidades humanas. Assim, condicionam também os processos essenciais dos ecossistemas naturais. As barragens têm um impacto significativo nos ecossistemas naturais e, inclusivé, nos criados pelo homem. Estes impactos não estão classificados para mais de 40000 grandes barragens espalhadas por todo mundo (WCD, 2000).

As barragens constituem obstáculos às trocas longitudinais ao longo dos rios. Ao alterar o padrão do caudal (por exemplo, intensidade, temporização e frequência), alteram o transporte de nutrientes, a temperatura da água e reduzem o transporte de sedimentos com efeitos geralmente negativos na qualidade da água. Estes impactes têm contribuído para a erosão dos deltas costeiros, requerendo milhões de euros de investimento na defesa das zonas costeiras. A redução anual dos caudais de jusante das barragens afecta a produtividade dos estuários e deltas (WCD, 2000).

A existência de várias barragens ao longo de um mesmo rio agrava os impactes no ecossistema. Até à data, 61% dos grandes rios do mundo já são considerados massas de água altamente ou moderadamente modificadas ou fragmentadas. Em muitos casos, elevadas percentagens de sedimentos ficam presos entre barragens. A migração dos peixes é também afectada, mesmo que seja só por uma única barragem, sendo que se forem mais do que uma, a situação agrava-se dramaticamente (WCD, 2000).

O Douro é a maior bacia hidrográfica da Península Ibérica, drenando cerca de 17% do território combinado de Portugal e Espanha. No território Português, o rio foi seccionado, aproximadamente, a cada 30 km por barragens, originando cerca de 10 lagos artificiais. A albufeira de Crestuma-Lever foi formada em 1985 (Figura 1), quando a última grande barragem no curso principal do Rio Douro começou a operar. Desde 1987, esta barragem abastece com água potável cerca de 20% da população portuguesa. Pela sua localização, integra os efeitos acumulados pelos usos da água ao longo de toda a bacia hidrográfica do Douro. O caudal de água doce afluente ao reservatório de Crestuma-Lever é controlado pelas necessidades hidroeléctricas dos dois lados da fronteira e também pelas necessidades de irrigação no território espanhol, introduzindo assim variações anuais, sazonais, diárias e também horárias, ao regime natural de caudais (Magalhães *et al.*, 2005). Além disso, as alterações climáticas deslocaram a época das chuvas para a parte final da Primavera, introduzindo alterações no padrão normal do caudal. Ao longo dos últimos 30 anos, a disponibilidade de água doce foi reduzida em cerca de 20%, para os actuais 505 m³/s. Além disso, houve um aumento das épocas de seca durante os anos 90, o que contribuiu também para esta redução. Frequentemente, o caudal é interrompido ao longo de vários dias, especialmente em Agosto, ou numa base diária de 8 a 23 horas, seguida de descargas pulsantes da ordem dos 300 a 1000 m³ s⁻¹. Assim, o caudal médio diário não reflecte a verdadeira dinâmica do sistema. Desde o final dos anos 80, a qualidade da água demonstra elevados sinais de degradação. Os valores de nitrato duplicaram e os “*blooms*” de cianobactérias usuais no final do verão, são cada vez mais frequentes (Magalhães *et al.*, 2005).



Fig.1 Mapa da albufeira de Crestuma-Lever (Adaptado de IGE0, 2004).

Existe na albufeira uma central termoelétrica a operar, em tempo completo descarregando um efluente térmico (15 m³ s⁻¹) sem arrefecimento, a montante e bastante perto da captação de água para consumo humano. Uma segunda termoelétrica, contígua à primeira, opera esporadicamente. A dragagem de areias é também uma actividade frequente no leito, levan-

do à ressuspensão de sedimentos e ao aumento da turbidez da coluna de água. A redução a longo termo dos caudais médios e o aumento da frequência das fortes injeções de caudal induzidas pela produção de energia hidroelétrica, levam ao aparecimento de alterações na estrutura e funcionamento dos ecossistemas, em escalas temporais diferentes. Resultados de modelos já implementados na albufeira de Crestuma-Lever, sugerem que fenómenos de ressonância podem resultar da interacção entre as descargas pulsantes, injectadas todas as manhãs quando as necessidades hidroeléctricas aumentam, com o aquecimento solar e o efluente térmico proveniente da central termoelétrica. Estes fenómenos têm o potencial de produzir grandes oscilações de temperatura na parte final do reservatório. Em situações extremas, estes fenómenos podem provocar acontecimentos indesejáveis, tais como, “*blooms*” de fitoplâncton, morte de peixes, etc (Duarte et al., in prep).

Tendo em conta a Directiva Quadro da Água (DQA) e a forma inovadora com que os recursos hídricos e respectiva gestão são encarados na mesma, obrigando os Estados Membros (EM) a caracterizar as condições biológicas de referência dos seus ecossistemas aquáticos e determinando que a referida caracterização pode ser baseada na modelização, isto é, na utilização de modelos ecológicos, surgiu a ideia de desenvolver um modelo ecológico da Albufeira de Crestuma-Lever.

Este modelo surge como parte integrante de um projecto financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), denominado PROJECTO ECODOURO – *Modelação do efeito da redução do caudal e de descargas intermitentes sobre a dinâmica e processos da albufeira de Crestuma-Lever* (Ref. POCTI/MSG/45533/2002). O Centro de Investigação Interdisciplinar Marinha e Ambiental (CIIMAR) e o Centro de Estudos de Análise e Modelação Ambiental (CEMAS) da Universidade Fernando Pessoa (UFP) constituem as duas equipas de investigação envolvidas neste projecto, tendo como uma das suas tarefas principais o desenvolvimento, implementação, calibração e validação do modelo.

Os principais objectivos do Ecodouro são avaliar os efeitos a longo prazo da redução de caudais na qualidade da água do reservatório de Crestuma-Lever e o efeito das oscilações de caudais de alta-frequência, condicionados pelas necessidades de produção de energia eléctrica, na dinâmica do ecossistema, em termos de estratificação térmica da coluna de água, turbidez, oxigénio dissolvido, concentrações de nutrientes, fitoplâncton e produção primária. A qualidade de água assume particular relevância na Barragem de Crestuma-Lever, pois no seu limite jusante encontra-se uma Estação de Tratamento de Água (ETA), cuja captação abastece cerca de dois milhões de pessoas (ADP, 2004). Os objectivos deste trabalho são apresentar um resumo da análise e verificação do modelo desenvolvido, incluindo uma referência à análise de sensibilidade aos parâmetros. O trabalho aqui apresentado é parte de uma monografia recentemente concluída na UFP (Azevedo, 2004).

2. DESCRIÇÃO DO MODELO

Neste trabalho utilizou-se um modelo acoplado hidrodinâmico-termodinâmico-biogeoquímico, bidimensional (2D), resolvido na vertical e baseado numa malha de diferenças finitas. O sub-modelo hidrodinâmico, forçado pelos caudais afluentes à barragem, é um modelo baroclínico que simula a velocidade da corrente e respectivo caudal, a partir das equações de Navier-Stocks e da equação da continuidade, e utiliza a equação do transporte (Knauss, 1997) para calcular os fluxos de diferentes propriedades, quer em profundidade, quer ao longo da barragem. O sub-modelo termodinâmico calcula as variações locais da temperatura da água, em função da radiação solar, da temperatura do ar e da velocidade do vento, segundo equações descritas em Brock (1981) e Portela & Neves (1994). O sub-modelo biogeoquímico simula as alterações locais das propriedades da água, resultantes dos ciclos biogeoquímicos do azoto e do fósforo e dos processos de crescimento do fitoplâncton.

A malha de diferenças finitas utilizada para implementar o modelo é do tipo descentrado (Vreugdenhil, 1989) [as propriedades vectoriais, tais como as velocidades e os caudais, são calculadas nos lados das células da malha e as propriedades escalares, tais como as concentrações das diversas variáveis, no centro das mesmas], sendo a barragem dividida em 22 compartimentos longitudinais, com 500 m de comprimento, e um conjunto de camadas verticais. Utiliza-se um método numérico em que a variação do nível da água é calculada implicitamente, a partir da integração vertical da divergência dos caudais afluentes e difluentes a cada dos 22 compartimentos. Segue-se o cálculo implícito das componentes horizontais da velocidade, pela equação de Navier-Stocks, e o cálculo das componentes verticais, pela equação da continuidade. Finalmente, actualiza-se o volume de cada um dos compartimentos do modelo e transportam-se as propriedades da água entre os mesmos e na vertical, usando a equação do transporte. Detalhes sobre o modelo, respectivas equações e parâmetros, conforme resolvidas pelo segundo autor deste trabalho, podem ser consultados em Azevedo (2004).

O modelo 2D representa o reservatório como um canal em forma de V, dividido em diversos compartimentos e camadas. Inicialmente, a largura média e volume de cada compartimento foram estimados através de distribuições de frequência de profundidades medidas durante algumas campanhas batimétricas. Cada compartimento do modelo foi então dividido em 7 camadas verticais, tendo cada uma delas (excepto a do fundo) 2.5 m de profundidade inicial. Recentemente, os resultados de campanhas batimétricas realizadas na barragem de Crestuma-Lever, foram introduzidos num Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software ArcGIS 8.1, de forma a obter estimativas mais precisas da geometria real dos compartimentos e das camadas (Figura 2).



Fig.2 Perspectiva 3D do Reservatório de Crestuma-Lever através do ArcGis.

O modelo foi implementado utilizando o software EcoDynamo – uma plataforma para modelação ecológica em ambiente Windows (Pereira & Duarte, 2005) – seguindo uma metodologia de programação orientada por objectos.

No EcoDynamo, o transporte hidrodinâmico, a temperatura da água, os nutrientes e o fitoplâncton são implementados através de diferentes sub-modelos, organizados em classes ou objectos. Estas classes podem ser *ligadas* ou *desligadas* através da interface do software. Cada classe inclui um conjunto de variáveis e cada variável é descrita por uma *equação diferencial*, a qual corresponde a um balanço de massa, incluindo a produção, decaimento e processos de transporte (ver Tabela 1). A forma como cada destes processos é calculado, encontra-se descrita em Azevedo (2004).

A implementação de um modelo deve ser efectuada em interacção constante com a aquisição de resultados experimentais. Esta interacção permite

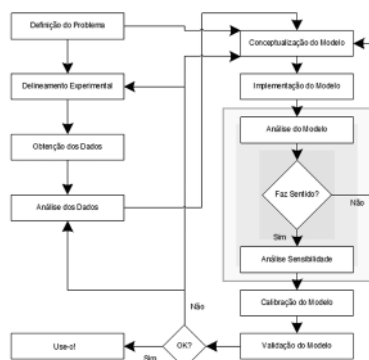


Fig.3 Processo de construção de um modelo. Os constituintes envolvidos a cor representam as fases abrangidas neste trabalho.

às equipas envolvidas no processo de modelização obter as informações que necessitam sobre os ecossistemas em estudo. Além disso, no processo de desenvolvimento de um modelo, surgem frequentemente dificuldades, resultantes do conhecimento pouco preciso do valor de certos parâmetros ou da natureza de determinados processos que acabam por proporcionar perguntas importantes, que podem ser respondidas através de trabalho experimental.

O desenvolvimento de um modelo não é só um processo interactivo, como também um processo iterativo, pois após uma primeira fase de implementação, não é raro que, depois de realizadas as primeiras simulações, se chegue à conclusão que a estrutura do modelo necessita de alterações, por não responder como esperado em função do que se sabe sobre o sistema real. Existem vários passos em que se pode

Tabela 1 Equações gerais do modelo representando as variações das variáveis de estado em função do tempo.

Velocidade da Corrente (m s ⁻¹)		
$\frac{du}{dt} = \text{pressure_gradient_force} \pm \text{advection_of_momentum} \pm \text{diffusion_of_momentum} \pm \text{drag_forces}$		[EQ.1]
Variações da Temperatura da Água (°C d ⁻¹)		
$\frac{dT_{ij}}{dt} = \text{solar_radiation} + \text{atmospheric_emission} - \text{water_emission} - \text{latent_heat} \pm \text{heat_advection} \pm \text{heat_diffusion}$		[EQ.2]
Variação do Azoto Mineral Dissolvido (μmol L ⁻¹ d ⁻¹)		
$\frac{dDIN_{ij}}{dt} = \text{PHYRespN}_{ij} + \text{PHYExudN}_{ij} + \text{PHYMortN}_{ij} + \text{PHYSetN}_{ij} + \text{DINloads}_{ij} - \text{PHYUptakeN}_{ij} \pm \text{Advection} \pm \text{Diffusion}$ $DIN_{ij} = \text{Nitrate}_{ij} + \text{Nitrite}_{ij} + \text{Ammoniu}_{mi}$		[EQ.3]
Variação do Fósforo Mineral Dissolvido (μmol L ⁻¹ d ⁻¹)		
$\frac{dP_{ij}}{dt} = \text{PHYRespP}_{ij} + \text{PHYExudP}_{ij} + \text{PHYMortP}_{ij} + \text{PHYSetP}_{ij} + \text{PLoads}_{ij} - \text{PHYUptakeP}_{ij} \pm \text{Advection} \pm \text{Diffusion}$		[EQ.4]
Variações na Biomassa de Carbono do Fitoplâncton (μg C L ⁻¹ d ⁻¹)		
$\frac{dPHYC_{ij}}{dt} = \text{PHYC}_{ij} \left(\frac{\text{PHYGPP}_{ij} - \text{PHYExud}_{ij} - \text{PHYResp}_{ij} - \text{PHYMort}_{ij} - \text{PHYSet}_{ij}}{\text{PHYC}_{ij}} \right) \pm \text{Advection} \pm \text{Diffusion}$ Também expresso em μg Chl L⁻¹ h⁻¹ [PHYChl_{ij}] utilizando uma razão Carbono:Clorofila de 50 (Jørgensen & Jørgensen (1991))		[EQ.5]
Variações na Biomassa de Azoto do Fitoplâncton (μg N L ⁻¹ d ⁻¹)		
$\frac{dPHYN_{ij}}{dt} = \text{PHYUptakeN}_{ij} - \text{PHYRespN}_{ij} - \text{PHYExudN}_{ij} - \text{PHYMortN}_{ij} - \text{PHYSetN}_{ij} \pm \text{Advection} \pm \text{Diffusion}$		[EQ.6]
Variações na Biomassa de Fósforo do Fitoplâncton (μg P L ⁻¹ d ⁻¹)		
$\frac{dPHYP_{ij}}{dt} = \text{PHYUptakeP}_{ij} - \text{PHYRespP}_{ij} - \text{PHYExudP}_{ij} - \text{PHYMortP}_{ij} - \text{PHYSetP}_{ij} \pm \text{Advection} \pm \text{Diffusion}$		[EQ.7]
PHYGPP _{ij}	Produtividade primária bruta	d ⁻¹
PHYExud _{ij}	Taxa de exsudação	
PHYResp _{ij}	Taxa de respiração	
PHYMort _{ij}	Taxa de mortalidade	
PHYSed _{ij}	Taxa de sedimentação	

$PHYMortN_{ij}$	Mortalidade do fitoplâncton	$\mu\text{mol N L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ou $\mu\text{g N L}^{-1} \text{d}^{-1}$
$PHYExudN_{ij}$	Exsudação do fitoplâncton	
$PHYRespN_{ij}$	Respiração do fitoplâncton	
$PHYUptakeN_{ij}$	Absorção de azoto pelo fitoplâncton	
$PHYSetN_{ij}$	Sedimentação do fitoplâncton	$\mu\text{mol P L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ou $\mu\text{g P L}^{-1} \text{d}^{-1}$
$PHYMortP_{ij}$	Mortalidade do fitoplâncton	
$PHYExudP_{ij}$	Exsudação do fitoplâncton	
$PHYRespP_{ij}$	Respiração do fitoplâncton	
$PHYUptakeP_{ij}$	Absorção de fósforo pelo fitoplâncton	
$PHYSetP_{ij}$	Sedimentação do fitoplâncton	

Nota – Todos os fluxos estão referidos em dias, excepto a velocidade da corrente, pois as suas unidades habituais são ms⁻¹.

dividir o processo de construção de um modelo (Figura 3), sendo que antes de se proceder à sua calibração e validação, importa verificar a sua estabilidade e quantificar a importância relativa dos diferentes parâmetros nas soluções obtidas.

3. METODOLOGIA DE ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO

A análise do modelo ecológico da barragem de Crestuma-Lever, discutida neste trabalho, dividiu-se nas seguintes fases: análise da estabilidade numérica do modelo, verificação da consistência do modelo relativamente a um conjunto de propriedades conhecidas do sistema em estudo, análise de sensibilidade do modelo aos parâmetros utilizados e comparação dos resultados do modelo com valores observados.

Análise de estabilidade

Relativamente à análise de estabilidade, importa referir que a escolha do passo de cálculo e dos métodos numéricos adequados, são condições necessárias para garantir soluções fiáveis. Isto porque os modelos matemáticos são geralmente baseados em soluções numéricas dos problemas reais, onde o tempo e o espaço são tratados como unidades discretas. Neste trabalho utilizaram-se duas abordagens - uma analítica e outra empírica.

No primeiro caso, recorreu-se a condições de estabilidade definidas matematicamente, em função dos processos “mais rápidos” simulados pelo modelo. No caso presente, um desses processos é a *celeridade da onda gravítica* (v). Esta representa a velocidade com que a onda gravítica, resultante de variações locais do nível da água, se propaga ao longo de um corpo

líquido. Este tipo de onda é originado quando, por exemplo, há uma descarga de água na zona montante de uma barragem, sendo um dos fenómenos descritos no sub-modelo hidrodinâmico. Trata-se então de verificar a *Condição de Courant-Friedrichs-Levy* (CFL) (Dyke, 2001). A CFL cria um número adimensional designado por *número de Courant* (C), que é descrito pela seguinte equação (Dyke, 2001):

$$C = v \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (1)$$

Em que:

C – Número de Courant (adimensional);

v – Celeridade da onda gravítica (ms⁻¹);

Δt – Passo de cálculo (s);

Δx – Comprimento da célula (m), correspondente à resolução espacial do modelo.

Para que um modelo seja *estável*, é essencial que o número de Courant (C) seja menor do que 1, ou seja, importa que a distância percorrida pela onda gravítica durante o passo de cálculo do modelo seja inferior à dimensão das células do mesmo, ou seja, inferior à resolução com que o espaço é resolvido no modelo. Deste modo, **Δt** terá de ser tanto menor quanto menor for **Δx**.

Embora o cálculo da condição de Courant seja importante para majorar o passo de cálculo de um determinado modelo, é sempre possível que a solução seja influenciada de forma significativa pela utilização de passos de cálculo diferentes, ainda que dentro dos limites impostos pela CFL. Além disso, existem outras condições de estabilidade, tais como o número de difusão, que podem também ser importantes, embora mais difíceis de estimar, pois implicam o conhecimento dos coeficientes de difusão que por sua vez dependem das condições de simulação.

Uma das formas complementares de avaliar a estabilidade de um modelo matemático é, seguindo uma abordagem empírica, sujeitá-lo a vários passos de cálculo diferentes, comparando depois os resultados e determinando o passo de cálculo a partir do qual a solução estabiliza. A questão dos passos de cálculo não se coloca somente devido à estabilidade, mas também para otimizar o tempo de cálculo.

Verificação da consistência do modelo

Esta fase do trabalho consistiu em realizar um conjunto de simulações para verificar se o modelo reproduzia um conjunto de propriedades conhecidas *a priori* relativamente ao sistema em estudo. Por exemplo, sabe-se que durante o Verão, nos lagos e barragens, tende a ocorrer um ciclo de aquecimento ao longo do dia que leva à formação de uma camada de

água superficial mais quente, que delimita o chamado epilimnion, separada de uma camada mais fria, denominada hipolimnion, por uma zona de variação rápida da temperatura – a termoclina. O arrefecimento noturno tende a reduzir a espessura do epilimnion, podendo mesmo promover a sua mistura com o hipolimnion. Estes processos são muito importantes para a biogeoquímica dos ecossistemas lênticos estando, entre outras coisas, relacionados com a eutrofização (Wetzel, 1983). Durante o Inverno, este processo de estratificação não tende a ocorrer, pois a temperatura baixa do ar previne a formação de uma camada de água mais quente, apesar da energia solar recebida à superfície. Além disso, os caudais mais elevados também promovem a mistura vertical da água.

Em função do exposto, foram realizadas simulações para verificar se o modelo reproduz os fenómenos descritos da forma esperada. Para tal, procurou-se reproduzir situações típicas de Inverno e de Verão, quer a nível da temperatura do ar, quer a nível dos caudais afluentes à barragem.

Análise de sensibilidade

A grande incerteza associada à selecção dos valores dos parâmetros dos modelos ecológicos e a importância da quantificação da sua influência nos resultados dos mesmos, justificam a realização de uma análise de sensibilidade. A análise de sensibilidade ajuda a perceber quais os parâmetros que têm mais influência nas soluções, sendo assim um auxiliar importante para o processo de calibração de um modelo, ou seja, o processo através do qual se ajustam os valores de diversos parâmetros de modo a que o modelo produza soluções semelhantes aos resultados reais. Os resultados de uma análise de sensibilidade ajudam também a determinar quais os parâmetros que devem ser objecto de estudos experimentais mais detalhados.

Neste trabalho foram realizadas diversas simulações fazendo variar o valor referência dos parâmetros em $\pm 10\%$, quantificando as variações induzidas na concentração das variáveis descritas pelas equações diferenciais da Tabela 1. Além das variáveis, foram também considerados os fluxos de que as mesmas dependem (lado direito das equações). As simulações foram realizadas de modo a representar um período de 5 dias do mês de Julho, entre as 00:00 do dia 19 e as 00:00 do dia 24.

Comparação entre valores observados e valores previstos pelo modelo

No que concerne à comparação entre valores reais e valores simulados pelo modelo, utilizaram-se dois grupos de valores reais: um grupo recolhido de manhã entre as 7:00 e as 8:00, e outro recolhido entre as 16:00 e as 17:00, para os meses de Março, Julho e Setembro. O modelo foi inicializado com os valores medidos de manhã, esperando-se que os resultados se aproximassem dos valores medidos à tarde ao fim de oito horas de simulação.

Foram seleccionadas *quatro variáveis* para proceder à comparação:

- Temperatura da Água
- Clorofila
- Azoto Inorgânico Dissolvido (AID)
- Fosfato

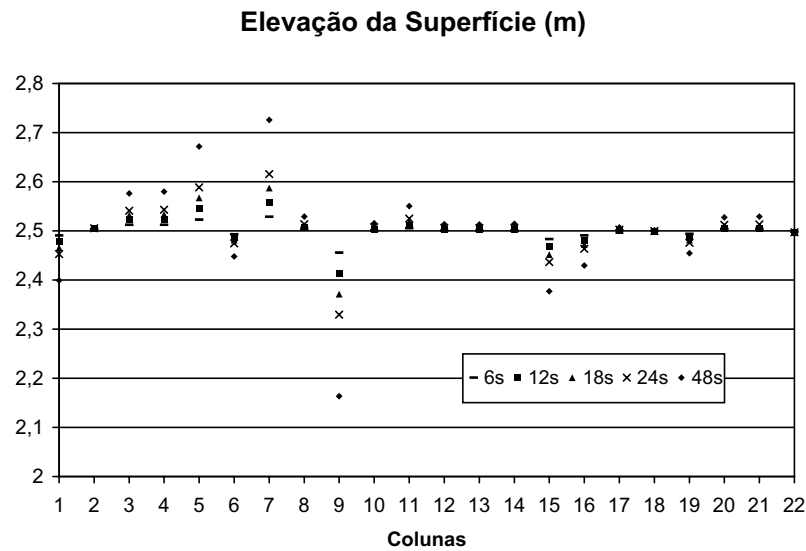


Fig.4 Comparação entre vários passos de cálculo para a simulação da *elevação da superfície* no mês de Julho (ver texto).

4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise de estabilidade

Como foi referido anteriormente, uma das formas possíveis de avaliar a estabilidade de um modelo matemático e otimizar o tempo de cálculo, é sujeitá-lo a vários passos de cálculo diferentes, comparando depois os resultados obtidos.

Como exemplo, seleccionou-se a variável *elevação da superfície*, que pertence ao submodelo hidrodinâmico, o mais sensível a variações no passo de cálculo. A grande sensibilidade da variável escolhida ao passo de cálculo resulta da tendência do modelo hidrodinâmico instabilizar quando o mesmo é aumentado, comprometendo a condição de Courant, no respeitante à velocidade de propagação da onda gravítica. O resultado é o aparecimento de desníveis na

Variação do N° de Courant com o Passo de Cálculo

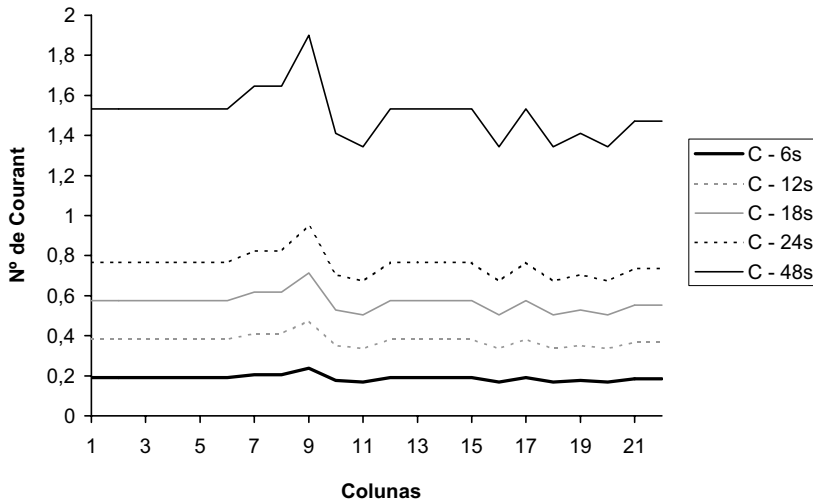


Fig.5 Variação do N° de Courant com o passo de cálculo para os resultados da variável *elevação da superfície* (ver texto).

superfície da água muito exagerados relativamente ao que se pode observar na realidade. Na Figura 4 apresentam-se os resultados da variável *elevação da superfície*, a qual é um óptimo exemplo da influência dos passos de cálculo na estabilidade dos modelos. Importa salientar que nos gráficos apresentados, as abcissas representam as secções em que a barragem foi dividida, sendo que a secção mais à direita termina no paredão da barragem.

Como se pode observar pelo gráfico, o modelo instabiliza quando sujeito a passos de cálculo elevados, principalmente nas zonas mais profundas do reservatório, tais como a secção 9, que chega aos 40 m. Este facto explica-se pela relação a velocidade de propagação da onda gravítica com a profundidade (Dyke, 2001):

$$v = \sqrt{gz} \quad (2)$$

Onde g é a aceleração da gravidade e z a profundidade.

A instabilidade surge na forma de grandes oscilações na superfície da água. Tendo em conta estes resultados, calculou-se a velocidade de propagação da onda gravítica (v) para todas as secções, utilizando depois o seu valor para calcular o número de Courant correspondente.

Na Figura 5 pode constatar-se a razão da instabilidade dos resultados da variável *elevação da superfície*, quando sujeita a um passo de cálculo da ordem dos 48s. Essa instabilidade ocorre pois a CFL não é cumprida, obtendo-se para o passo de cálculo de 48s, números de Courant entre 1,4 e 1,8, portanto muito superiores ao limite de estabilidade de 1. Note-se que mesmo para um passo de cálculo de 24s, obtêm-se números de Courant bastante próximos de 1, o que também pode potenciar situações de instabilidade. Em suma, de forma a assegurar condições de estabilidade razoáveis, equivalente a números de Courant da ordem dos 0,4-0,5 é necessário utilizar passos de cálculo inferiores a 12s.

Verificação da consistência do modelo

Na Fig. 6 apresentam-se os resultados de simulações que ilustram a capacidade do modelo de simular o ciclo de formação e decomposição da termoclina.

Estas imagens mostram que o modelo tende a representar correctamente os processos de evolução ao longo do dia, principalmente no que diz respeito à termoclina, pois nota-se a sua formação ao longo do dia através do progressivo aquecimento da água à superfície em direcção à barragem. Importa salientar que nesta simulação se assumiu que a temperatura do ar permanecia constante. Deste modo, o aquecimento previsto da temperatura da água à superfície resultou somente do efeito da radiação

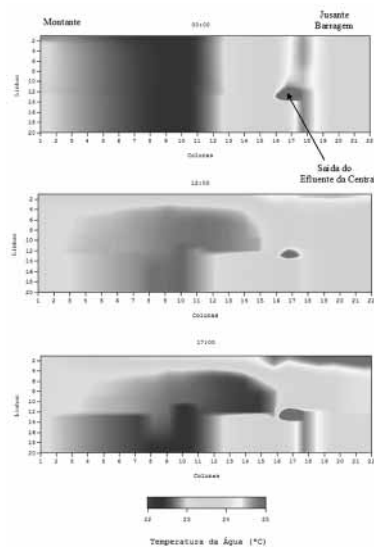


Fig.6 Evolução da Temperatura da Água ao longo de um dia do mês de Julho, salientando-se a formação da termoclina (ver texto).

solar (simulada pelo modelo). O arrefecimento nocturno resultou principalmente, da emissão de radiação infravermelha a partir da superfície líquida. A disponibilidade de valores horários de temperatura, tenderia a evidenciar mais a formação da termoclina.

Análise de sensibilidade

Como foi referido na Metodologia, as simulações foram realizadas fazendo-se variar o valor de referência dos parâmetros em $\pm 10\%$ e quantificando as principais variações induzidas nalgumas variáveis do modelo. Analisou-se a sensibilidade das variáveis de estado a cerca de 12 parâmetros, para o que foi necessário realizar cerca de 36 simulações. Devido a limitações de

espaço, apresenta-se aqui somente uma síntese dos principais resultados. Assim, na Tabela 2, apresentam-se as variações superiores a 5%, distribuídas por gamas de valores. Por exemplo, a Produção Primária Líquida (PPL) sofreu variações entre ± 5 a 10% em resposta a variações do parâmetro R_0 (Respiração de sustentação) de $\pm 10\%$. A PPL é uma medida da matéria orgânica produzida pelos produtores primários (neste caso, o fitoplâncton), depois de subtraídos os gastos respiratórios. Deste modo, é de esperar que seja influenciada pelos parâmetros R_0 e R_{dark} (Coeficiente linear de aumento da biomassa específica da respiração no escuro), que condicionam a taxa respiratória dos referidos organismos (Azevedo, 2004).

Tabela 2 Resumo dos resultados da Análise de Sensibilidade para o mês de Julho (ver texto).

Variação [%]	Chlorophyll	NPP	B/P	Temp.
5 – 10		R_0 R_{dark} TempAugRate	P_{max} R_0 R_{dark} TempAugRate	
10 – 20		Horizontal diffusion	Horizontal diffusion	

O parâmetro P_{max} , que corresponde à taxa máxima de fotossíntese/produção primária, está logicamente relacionado com a PPL. O parâmetro TempAugRate (Taxa de aumento de temperatura) está relacionado com os dois processos referidos anteriormente: fotossíntese e respiração. A importância deste parâmetro justifica-se pela relação exponencial que ambos os processos têm com a temperatura, sendo o parâmetro em questão o expoente da referida relação (cf. – Azevedo, 2004). Importa salientar que tanto a PPL, como a relação entre a biomassa média do fitoplâncton e a PPL (B/P) – que reflectem processos e variáveis biológicos – são bastante sensíveis ao coeficiente de difusão turbulenta horizontal. Este parâmetro condiciona a dispersão longitudinal das propriedades da água e dos organismos em suspensão na mesma. Ou seja, valores mais elevados de difusão, asseguram uma distribuição longitudinal mais rápida das referidas propriedades.

Não se pretende aqui explicar detalhadamente os resultados obtidos, mas tão somente fazer uma referência breve aos mesmos, salientando a sua importância no processo de calibração do modelo, a ser levado a cabo presentemente. Em função dos resultados da análise de sensibilidade é agora possível saber quais os parâmetros mais relevantes para calibrar o modelo.

Comparação entre valores observados e valores previstos pelo modelo

De seguida apresentam-se, sob a forma de gráfico, algumas comparações entre resultados obtidos pelo modelo para alturas em que há dados disponíveis (cf. – 3.).

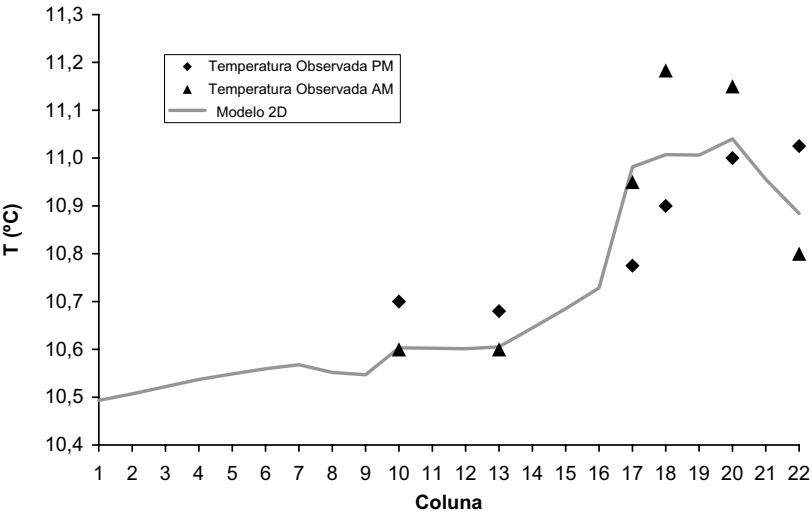


Fig.7 Comparação entre valores observados e calculados pelo modelo para a Temperatura da Água para o mês de Março.

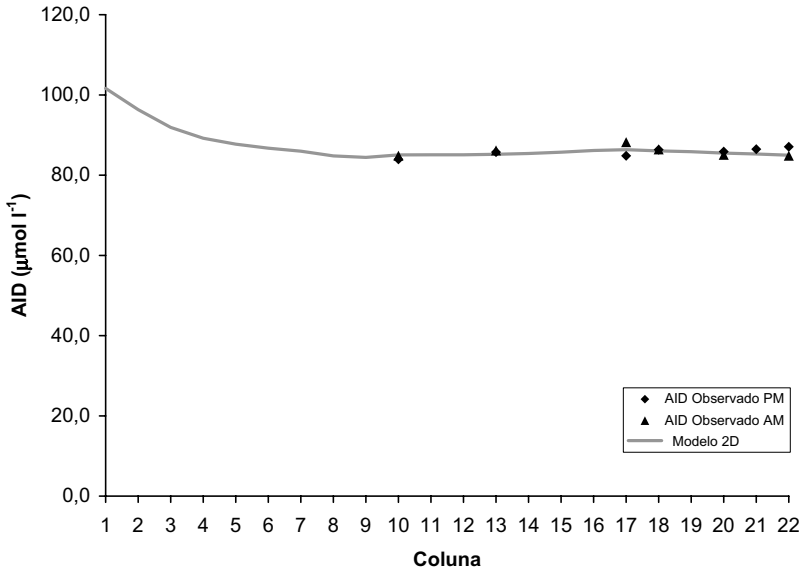


Fig.8 Comparação entre valores observados e calculados pelo modelo para o Azoto Inorgânico Dissolvido (AID) para o mês de Julho.

Apesar de ser necessário desenvolver mais esforços para melhorar o desempenho do modelo, este demonstra capacidade de prever as tendências demonstradas pelos dados reais, necessitando de ser calibrado para otimizar o detalhe da reprodução dos valores reais.

5. CONCLUSÕES

Os processos de análise e verificação dos modelos devem ser encarados como iterativos, e não como imediatos. Logo, não se deve esperar que um modelo funcione como esperado à primeira tentativa, sendo necessário analisar a sua lógica interna, a sua estabilidade e consistência de resultados.

Em função desta primeira análise, foi possível otimizar o passo de cálculo do modelo. Este exibiu um comportamento “normal” no que diz respeito à reprodução dos ciclos de aquecimento da água e formação da termoclina. Além disso, a pequenas escalas temporais reproduz relativamente bem o comportamento de algumas propriedades da água.

Os resultados apresentados são somente um primeiro teste à capacidade predictiva do modelo, de modo a verificar se os valores calculados têm algum realismo. O passo seguinte é a realização de testes para períodos mais longos (até um ano), dependentes da disponibilidade de dados de caudal recebidos pela albufeira e descarregados pela barragem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADP, (2004). Águas do Douro e Paiva – Sistema Multimunicipal. [Em Linha]. Disponível em <http://www.addp.pt/1024/index2n.htm>. [Consultado em 23/11/2004].

Azevedo, (2004). *Análise e Verificação de um Modelo Ecológico para a Albufeira de Crestuma-Lever*. Universidade Fernando Pessoa, Porto.

Brock, T.D. (1981). Calculating solar radiation for ecological studies. *In: Ecol. Modelling* 14, pp. 1 – 9.

DQA, (2000). *Directiva 2000/60/CE – Directiva Quadro da Água*. União Europeia.

Dyke, P. P. G., (2001). *Coastal and Shelf sea modelling*. Kluwer.

Garcia, R., (2004). *Sobre a Terra: um guia para quem lê e escreve sobre ambiente*. Público.

IGEO, (2004). IGEO – Serviços. [Em Linha]. Disponível em <http://www.igeo.pt/portugues/Frameset-servicos.htm>. [Consultado em 23/11/2004].

Knauss, J.A., (1997). *Introduction to physical oceanography*. Prentice-Hall.

Magalhães C., Joye, S. B., Moreira, R., C. M., Wiebe, W. J. e A.A. Bordalo (2005). Effect of salinity and inorganic nitrogen concentrations on nitrification and denitrification rates in intertidal sediments and rocky biofilms of the Douro River estuary, Portugal. *In: Water Research* 39, pp. 1783-1794.

Pereira, A. e Duarte, P. (2005). *EcoDynamo Ecological Dynamics Model Application*. Universidade Fernando Pessoa, Porto.

Portela, L.I. e Neves, R., (1994). *Modelling temperature distribution in the shallow Tejo estuary*. *In: Tsakiris and Santos (Editors), Advances in Water Resources Technology and Management*, Balkema, Rotterdam, pp. 457 - 463.

Vreugdenhil, C. B., (1989). *Computational Hydraulics - An Introduction*. Springer-Verlag.

Wetzel, R.G., (1983). *Limnology*, 2ª Ed., Saunders College Publishing, USA. (Trad.portuguesa Limnologia, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1993).

WCD, (2000). *Dams, Ecosystem Functions and Environmental Restoration*. World C. on Dams.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o financiamento da Fundação para a Ciência e Tecnologia, através do projecto Ecodouro – *Modelação do efeito da redução do caudal e de descargas intermitentes sobre a dinâmica e processos da albufeira de Crestuma-Lever* (Ref. POCTI/MSG/45533/2002) e com o apoio logístico da Turbogás SA, Contributo nº1 do projecto POC-TI/MSG/45533/2002.