

**Relatório final**  
**Projeto EUTROPHOS**

# Índice

Resumo .....	3
1. Introdução.....	4
1.1. Objectivo.....	4
1.2. Metodologia .....	4
2. Descrição do local de estudo .....	5
2.1. Cota da albufeira .....	5
2.2. Nutrientes e produção primária na albufeira .....	6
3. O modelo hidrodinâmico MOHID-3D.....	8
3.1. Equações do modelo .....	8
3.2. Condições iniciais e de fronteira .....	11
3.3. Parametização do modelo .....	11
3.4. Implementação do modelo.....	12
3.4.1. Batimetria .....	12
3.4.2. Discretização vertical.....	14
3.4.3. Forçamento atmosférico .....	15
3.4.4. Entradas e saídas de água .....	15
4. O modelo ecológico CEQUAL-W2 .....	16
4.1. Equações do modelo .....	16
4.1.1. Limitação pela temperatura .....	17
4.1.2. Limitação pela luz.....	17
4.1.3. Limitação por nutrientes.....	18
4.2. Parametização do modelo .....	18
5. Resultados e discussão .....	19
5.1. Hidrodinâmica.....	23
5.2. Processos biogeoquímicos .....	24
5.2.1. Mapas 2D à superfície.....	27
5.2.2. Comparação entre cenários.....	28
5.2.2.1. Séries de superfície.....	28
5.2.2.2. Perfis verticais no paredão .....	30
6. Conclusões.....	31
7. Bibliografia.....	32

## Resumo

Sabendo que a determinação dos factores responsáveis pela qualidade da água e o estudo de cenários para a melhoria da mesma não é possível sem ajuda de modelos numéricos que permitam prever a evolução das condições da água após a introdução de medidas de correcção, foi utilizado o modelo hidrodinâmico MOHIDWater 3-Dimensões (IST-Maretec) ao qual foi acoplado o modelo ecológico CEQUAL-W2 (Cole & Wells., 2003) que permitem simular a hidrodinâmica da albufeira e os processos biogeoquímicos da água.

No entanto, até à data, este modelo foi pouco usado em albufeiras portuguesas e, por isso, parte deste trabalho serviu para melhorar o modelo MOHID em termos da sua diversidade e capacidade de simular os processos físicos e biogeoquímicos da água, assim como testar a potencialidade da integração de modelos de bacia com modelos de albufeiras.

Foi simulado o período de Julho a Setembro de 2001 em que, após o estudo de várias discretizações verticais para a representação da coluna de água, foi criado um novo tipo de discretização vertical especialmente útil para albufeiras e que foi capaz de simular eficazmente os processos hidrodinâmicos e o fenómeno de estratificação, o qual é o principal responsável pelo nível de qualidade da água na albufeira.

# **1. Introdução**

## **1.1. Objectivo**

O objectivo deste trabalho consiste na identificação dos factores determinantes do nível de qualidade da água na albufeira do Enxoé, nomeadamente no que toca às concentrações de nutrientes, fitoplâncton e cianobactérias, assim como o estudo de soluções possíveis para a melhoria da qualidade da água desta albufeira.

## **1.2. Metodologia**

Para poder identificar correctamente quais os factores determinantes para a qualidade da água verificada na albufeira do Enxoé foi utilizado o modelo MOHIDWater-3D hidrodinâmico ao qual foram acoplados os processos ecológicos usados no modelo CEQUAL-W2 com o intuito de simular os processos biogeoquímicos da albufeira.

Assim, e como base para o modelo, foi criada a batimetria partindo de linhas de cota da carta militar da zona, seguida da definição das condições de fronteira usadas no modelo, do forçamento atmosférico e finalmente da parametrização dos modelo hidrodinâmico e ecológico.

Os resultados foram depois analisados para determinar se o modelo conseguia reproduzir os processos físicos e biogeoquímicos mais importantes na albufeira, como a estratificação da coluna de água e a dinâmica do oxigénio, clorofíceas e cianobactérias. Com base nestes resultados foram feitas as devidas calibrações e reanálises dos resultados de modo a que os resultados obtidos pelo modelo representassem bem a realidade da albufeira, usando para tal valores medidos pelo INAG e pela Universidade de Évora.

## 2. Descrição do local de estudo

A área de drenagem da bacia hidrográfica da ribeira do Enxoé é de 60 km<sup>2</sup>, com cotas entre 160 e 350m, e o rio afluente (ribeira do Enxoé) tem uma extensão de 9 km. Em termos de precipitação, a média anual é de 500 mm e as utilizações do solo consistem em 30% de montado, 30% de olival e 30% de culturas anuais, sendo a presença animal constituída por 60 vacas/km<sup>2</sup>, 400 ovelhas/m<sup>2</sup> e 1000 hab(10/km<sup>2</sup>).

A albufeira do Enxoé foi construída com a finalidade de fornecer água para consumo humano, servindo como um reservatório de água para alturas com menor precipitação e escassez de água. A albufeira tem um comprimento de 3 km, uma largura de cerca de 600m, uma profundidade média ao nível pleno de armazenamento (NPA) de 4-5 metros, um volume de 10hm<sup>3</sup> e um tempo de residência de aproximadamente 1 ano, o que faz desta albufeira uma albufeira de profundidades muito baixas e com maior risco de desenvolver problemas de qualidade da água no período de Verão.

Em termos de localização, a albufeira em questão situa-se na margem esquerda do Rio Guadiana, no distrito de Beja e concelho de Serpa.

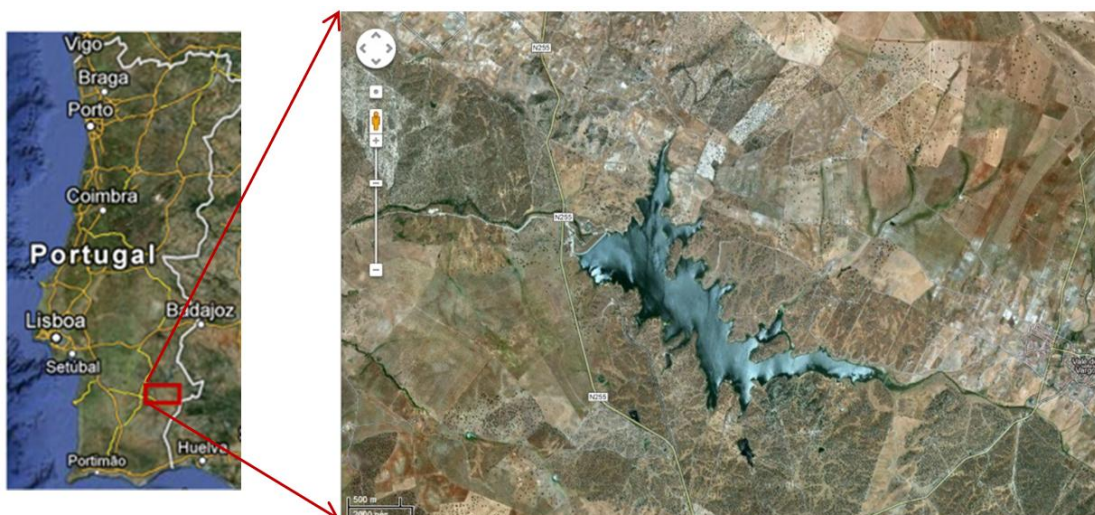


Figura 1: Localização da albufeira do Enxoé.

### 2.1. Cota da albufeira

Pode-se verificar pela Figura 2 que o nível da albufeira varia entre as cotas de 170.5 e 176 m, ou seja, o seu nível no período entre 2000 e 2013 tem uma amplitude de 6m – devido às fortes cheias verificadas nesses períodos – o que teve uma forte implicação na discretização vertical adoptada para o modelo (ver secção Resultados e discussão). Em anos médios (2002, 2003, 2004, 2007 e 2011) a variação do nível em período de verão situou-se em 1 metro – associado a perdas com evaporação, consumo humano e agrícola.

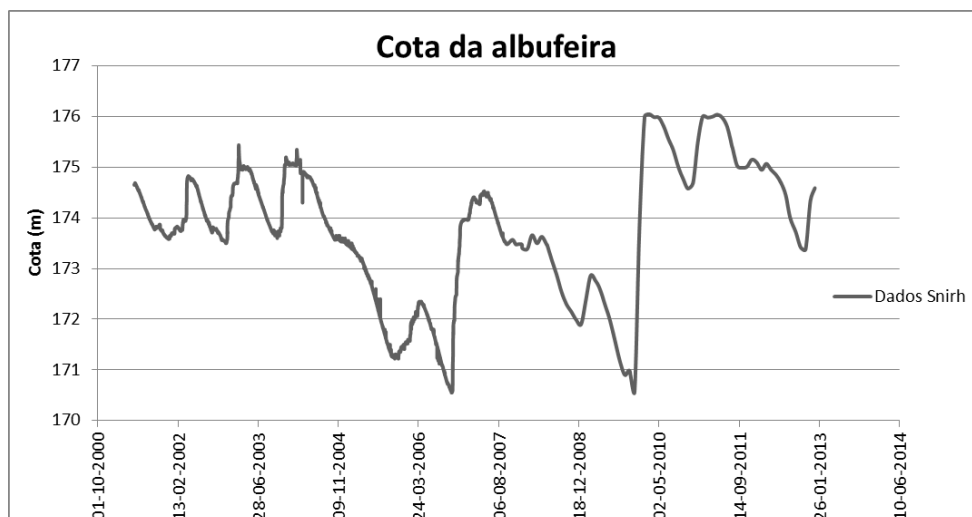


Figura 2: Variação da cota da albufeira do Enxóe no período 2001-2013.

## 2.2. Nutrientes e produção primária na albufeira

Uma vez que os caudais afluentes e a precipitação são baixos, e considerando que o volume da albufeira é também pequeno, são frequentes os problemas de escassez de água acompanhados de problemas de qualidade da água. A partir de 2001 verificaram-se os primeiros *blooms* de cianobactérias na albufeira durante o Verão, resultado de quantidades elevadas de fósforo na água e temperaturas elevadas, o que tornou o uso da água para fins de consumo cada vez mais dispendioso devido ao elevado nível de tratamento necessário.

Como se verifica na Figura 3 e na Figura 4, os nitratos e fosfatos aumentaram significativamente com as cheias de 2000/2011 e 2006, que trouxeram consigo os nutrientes acumulados na bacia hidrográfica durante a seca do ano anterior.

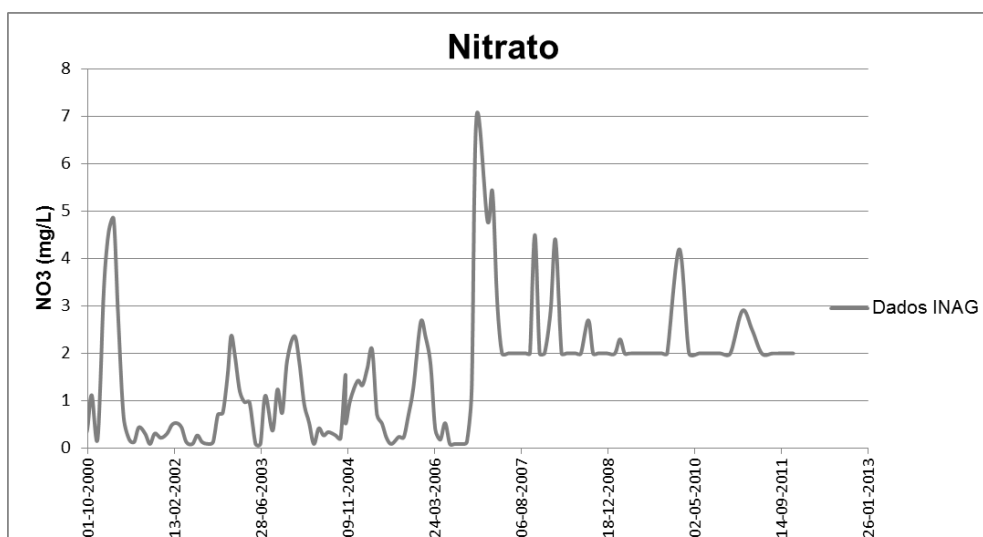
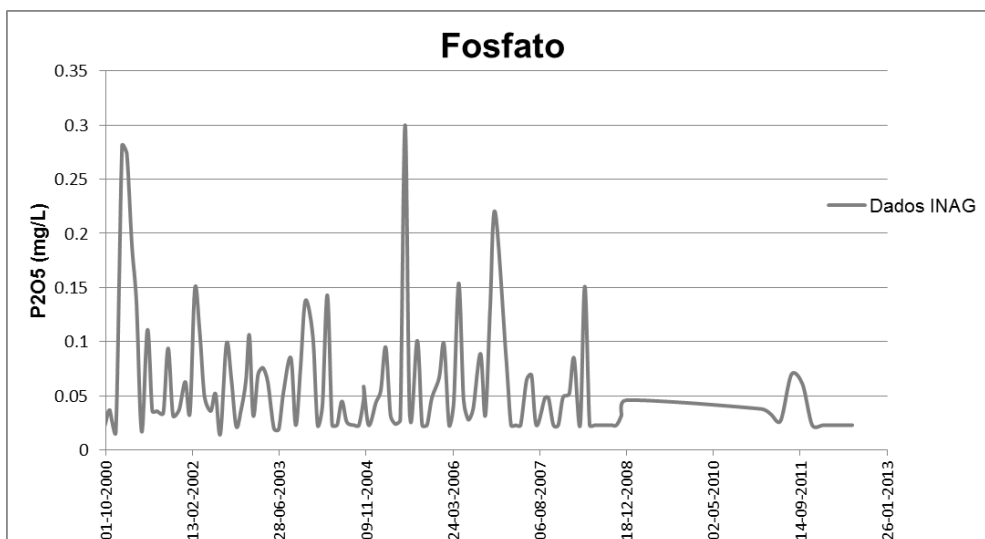
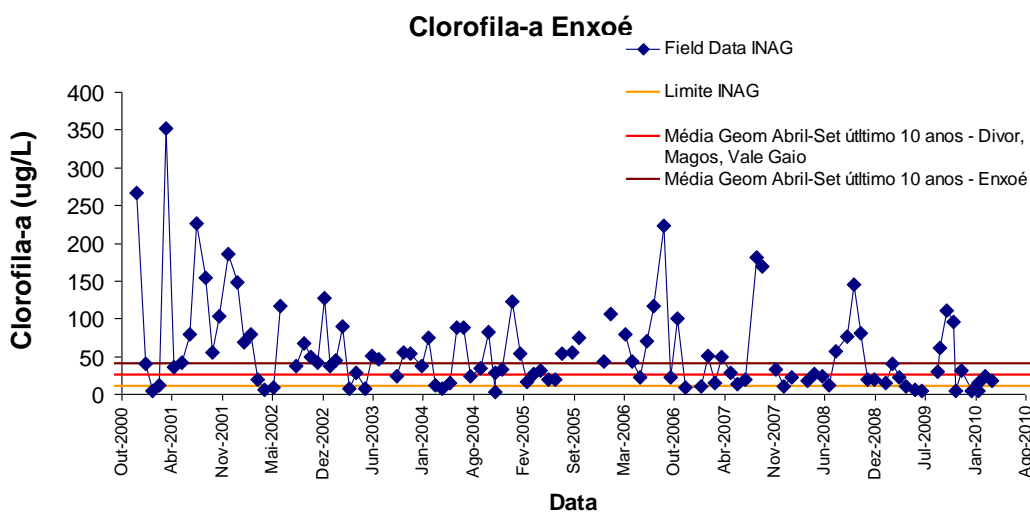


Figura 3: Variação da concentração de nitrato ao longo do período de 2000-2013.



**Figura 4:** Variação da concentração de fosfato ao longo do período de 2000-2013.

O aumento mais significativo de fósforo deu-se após as cheias de 2000 o que levou a que no Verão seguinte as cianobactérias, por serem mais competitivas em ambientes com pouco azoto, se tornassem no grupo de produtores primários dominante, tratando-se de um fenómeno pouco típico de zonas temperadas (ver Figura 5).



**Figura 5:** Variação da concentração de clorofila à superfície da albufeira do Enxoé entre 2000 e 2010, em comparação com as médias da albufeira do Enxoé, das albufeiras nacionais e do Divôr.

As concentrações de clorofila na albufeira confirmam o baixo nível da qualidade da água deste reservatório, sendo que a média geométrica ultrapassa largamente os valores presenciados noutras albufeiras e também o valor médio das albufeiras nacionais. Já a subida de nível no inverno de 2005/2006 foi responsável pelo transporte – por acção das chuvas – de nutrientes acumulados na bacia hidrográfica e que, associado a uma perda de nível na barragem, terá levado a um crescimento maior das cianobactérias no Verão de 2006.

### 3. O modelo hidrodinâmico MOHID-3D

O modelo usado neste trabalho foi o modelo MOHID water 3D hidrodinâmico e ecológico que, desde a sua construção, foi aplicado a variados locais sujeitos a diferentes condições (Vaz, Dias, Leitão, & Martins, 2005) (Trancoso, Saraiva, Fernandes, Pina, Leitão, & Neves, 2005) (Coelho, Neves, Leitão, Martins, & Santos, 1998).

Este modelo é constituído por um conjunto de módulos interligados entre si usando uma orientação por objectos em FORTRAN 95. Cada módulo é responsável pela gestão de uma parte da informação, constituindo um total de 40 módulos desenvolvidos ao longo de 3 décadas de trabalho de investigação, sendo um producto do grupo Maretec (*Marine Environment Technology Center*), pertencente à UTL.

#### 3.1. Equações do modelo

O modelo hidrodinâmico MOHID calcula as velocidades, o nível e as propriedades segundo uma malha de Arakawa C (Arakawa & Lamb, 1977) em volumes finitos, em que o nível e as propriedades da água são calculados no centro das células e as velocidades nas faces de cada célula.

Para o cálculo das velocidades o modelo usa uma discretização segundo (Abbott, Damsgaardand, & Rodenhuis, 1973) que consiste num esquema de 4 equações com dois níveis temporais, em que cada iteração divide-se em dois meios passos temporais, permitindo, implicitamente, o cálculo das 3 componentes da velocidade.

O esquema é apresentado na Figura 6 onde  $u$ ,  $v$ ,  $w$  representam os vectores das velocidades nas direcções  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , respectivamente,  $S$  e  $T$  representam a salinidade e a temperatura, respectivamente, e  $\eta$  representa o nível da água.

$$\eta^{t+1/2}(u^{t+1}, u^t, v^{t+1/2}, v^{t-1/2}) \rightarrow$$

$$w^{*t+1/2} \xrightarrow{\text{Actualização Da Geometria}} w^{t+1/2} \rightarrow S^{t+1/2}, T^{t+1/2} \rightarrow$$

$$\eta^{t+1}(u^t, u^{t+1}, v^{t+3/2}, v^{t+1/2}) \rightarrow u^{t+3/2} \rightarrow$$

$$w^{*t+1} \xrightarrow{\text{Actualização Da Geometria}} w^{t+1} \rightarrow S^{t+1}, T^{t+1}$$

**Figura 6:** Representação esquemática do algoritmo de cálculo das velocidades segundo Abbott (Abbott, Damsgaardand, & Rodenhuis, 1973).

Para o cálculo das velocidades o modelo assume 3 aproximações principais para além do equilíbrio hidrodinâmico: a incompressibilidade da água e as aproximações de Boussinesq e Reynolds. Todas as equações usadas pelo modelo foram derivadas destas aproximações.



Usa também uma formulação de volumes finitos para discretizar as equações, aplicando cada equação macroscopicamente a cada volume de controlo, sendo este determinado pela malha e geometria implementadas para o domínio de estudo.

As equações para o cálculo das velocidades horizontais médias são calculadas, em primeiro lugar, por meio das equações cartesianas 1 e 2, onde  $u$ ,  $v$  e  $w$  representam as componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  da velocidade,  $f$  é o parâmetro de Coriolis,  $\nu_H$  e  $\nu_t$  as viscosidades turbulentas horizontal e vertical,  $\nu$  é a viscosidade cinemática e  $p$  a pressão. O modelo calcula a variação da velocidade ao longo do tempo igualando esta ao somatório dos transportes advectivos com a força de coriolis, o gradiente de pressão e a difusão turbulenta.

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} = & -\frac{\partial(uu)}{\partial x} - \frac{\partial(uv)}{\partial y} - \frac{\partial(uw)}{\partial z} + fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \\ & + \frac{\partial\left((\nu_H + \nu)\frac{\partial u}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left((\nu_H + \nu)\frac{\partial u}{\partial y}\right)}{\partial y} + \frac{\partial\left((\nu_t + \nu)\frac{\partial u}{\partial z}\right)}{\partial z} \end{aligned} \quad \text{Equação 1}$$

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} = & -\frac{\partial(vu)}{\partial x} - \frac{\partial(vv)}{\partial y} - \frac{\partial(vw)}{\partial z} - fu - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \\ & + \frac{\partial\left((\nu_H + \nu)\frac{\partial v}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left((\nu_H + \nu)\frac{\partial v}{\partial y}\right)}{\partial y} + \frac{\partial_z\left((\nu_t + \nu)\frac{\partial v}{\partial z}\right)}{\partial z} \end{aligned} \quad \text{Equação 2}$$

Para a discretização temporal da velocidade é utilizado um algoritmo semi-implícito (ADI - *Alternating Direction Implicit*) que calcula alternadamente uma das componentes da velocidade horizontal implicitamente enquanto a outra é calculada explicitamente. A equação resultante é depois resolvida usando um algoritmo de Thomas (Thomas, 1949).

A utilização de um método implícito tem a grande vantagem de tornar o modelo bastante estável, sem comprometer os resultados, e com um ganho considerável de tempo de simulação, já que permite o uso de um passo temporal maior.

Após a determinação das velocidades horizontais é calculada a velocidade através da equação da continuidade (Equação 3). A equação para a superfície livre é obtida integrando a equação da continuidade ao longo da coluna de água segundo a Equação 4, onde  $\eta$  é a elevação da superfície livre e  $h$  a profundidade.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{Equação 3}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial \int_{-h}^{\eta} u dz}{\partial x} - \frac{\partial \int_{-h}^{\eta} v dz}{\partial y} \quad \text{Equação 4}$$

É assumida a aproximação hidrostática para a determinação da pressão, segundo a Equação 5, onde  $g$  representa a aceleração da gravidade e  $\rho$  a densidade da água. O modelo calcula a pressão integrando a Equação 5 desde a superfície livre até à profundidade pretendida, sendo a equação final dependente da pressão atmosférica, da elevação da superfície livre, da profundidade e da densidade na profundidade para a qual a pressão é calculada (ver Equação 6, onde  $\rho_0$  representa a densidade de referência e  $\rho'$  o desvio da densidade relativamente à densidade de referência, sendo a densidade calculada com base na temperatura e salinidade da água).

$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0 \quad \text{Equação 5}$$

$$p(z) = p_{atm} + g\rho_0(\eta - z) + g \int_z \eta \rho' dz \quad \text{Equação 6}$$

O fluxo difusivo à superfície é imposto exclusivamente pela tensão de corte exercida pelo vento, segundo a Equação 7, sendo que a tensão de corte do vento é calculada com base na Equação 8, onde  $C_D$  representa o coeficiente de arrastamento que depende da velocidade do vento,  $\rho$  é a densidade do ar e  $W$  a velocidade do vento calculada a 10 metros da superfície da água.

$$v \frac{\partial \overline{\mathbf{V}_H}}{\partial z} \Big|_{surface} = \overline{\boldsymbol{\tau}_w} \quad \text{Equação 7}$$

$$\overline{\boldsymbol{\tau}_w} = C_D \rho_a \overline{\mathbf{W}} \Big| \overline{\mathbf{W}} \Big| \quad \text{Equação 8}$$

O modelo hidrodinâmico é responsável pelos transportes advectivo e difusivo, pelas descargas de água no meio receptor, fluxo de sedimentos, trocas de calor e oxigénio com a atmosfera, sedimentação de substâncias particuladas e pelos balanços de massa das várias propriedades simuladas. Os *outputs* deste módulo são depois usados pelo modelo ecológico.

O transporte de uma propriedade  $A$  da água devido aos fenómenos de difusão e advecção é calculado pela Equação 9, em que  $u$ ,  $v$  e  $w$  representam as velocidades segundo  $x$ ,  $y$  e  $z$ ,  $v'_H$  e  $v'_t$  as difusividades de eddy horizontais e verticais, e  $v'_A$  a

difusidade molecular. Esta equação está na forma lagrangeana. No entanto, no presente trabalho foi usada a formulação eulariana, cuja diferença em relação à formulação lagrangeana consiste apenas na resolução da Equação 9, obtendo-se a Equação 10. Os primeiros 3 termos da direita desta equação representam o transporte por advecção e os 3 últimos, o transporte difusivo. A evolução temporal da propriedade A está dependente do balanço entre transporte advectivo, mistura turbulenta e fontes e poços que a propriedade simulada possa ter.

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(uA)}{\partial x} + \frac{\partial(vA)}{\partial y} + \frac{\partial(wA)}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial\left(v'_H \frac{\partial A}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(v'_H \frac{\partial A}{\partial y}\right)}{\partial y} + \frac{\partial\left((v'_i + v'_A) \frac{\partial A}{\partial z}\right)}{\partial z}$$

**Equação 9**

$$\frac{dA}{dt} = -\frac{\partial(uA)}{\partial x} - \frac{\partial(vA)}{\partial y} - \frac{\partial(wA)}{\partial z} +$$

$$\frac{\partial\left(v'_H \frac{\partial A}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(v'_H \frac{\partial A}{\partial y}\right)}{\partial y} + \frac{\partial\left((v'_i + v'_A) \frac{\partial A}{\partial z}\right)}{\partial z}$$

**Equação 10**

### 3.2. Condições iniciais e de fronteira

As várias propriedades da água foram inicializadas com base em valores obtidos pelo SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos) e assumindo uma homogeneidade da coluna de água uma vez que não existem dados em profundidade para o período simulado.

São usadas três condições de fronteira neste modelo. Na fronteira com terra o modelo impõe fluxos nulos, excepto no fundo onde impõe um fluxo difusivo de quantidade de movimento, na fronteira com a atmosfera os fluxos de algumas propriedades foram impostos a partir de dados de séries temporais obtidas no SNIRH (temperatura do ar, humidade, vento e radiação) e os restantes a partir de resultados obtidos por um modelo de bacias (SWAT) que calcula o balanço de massa da água para a bacia do Enxóé, fornecendo por isso os caudais de entrada, precipitação e evaporação.

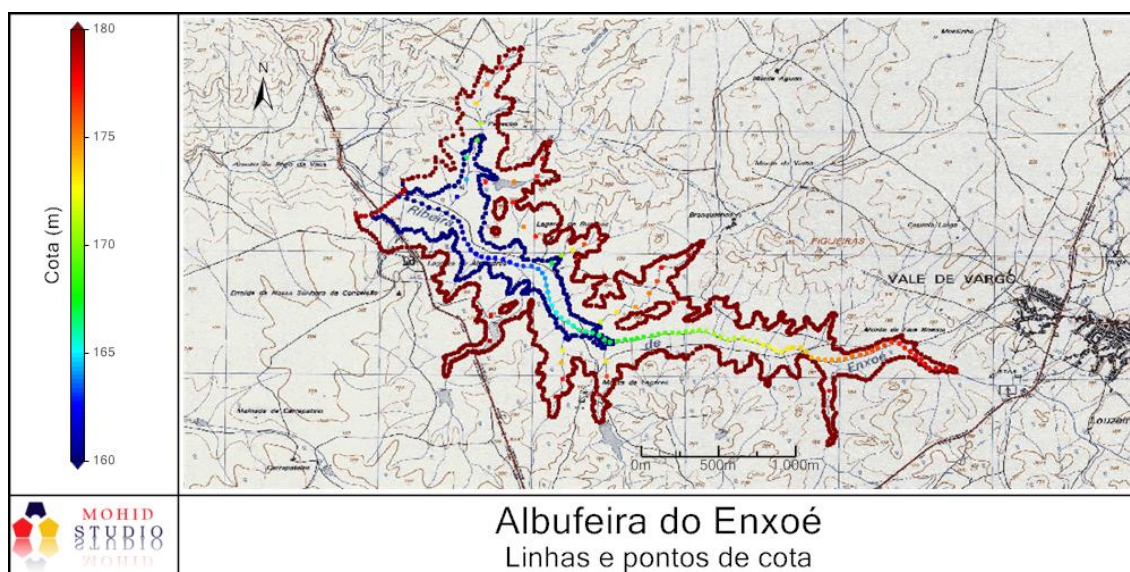
### 3.3. Parametrização do modelo

Na parametrização do modelo hidrodinâmico foi usado um método baroclínico e para a turbulência foi usado o modelo GOTM (*General Ocean Turbulence Model*). Na inicialização do modelo foi utilizado um período de incremento no vento de 10 dias de modo a evitar possíveis instabilidades do modelo.

### 3.4. Implementação do modelo

#### 3.4.1. Batimetria

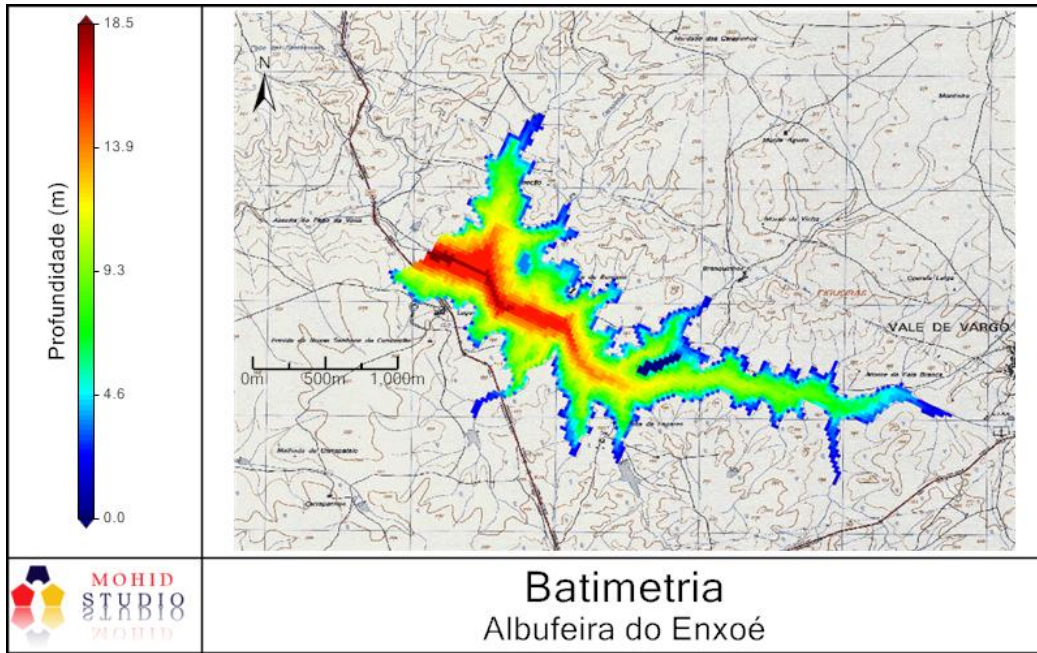
A construção da batimetria teve por base pontos batimétricos obtidos através da carta militar com linhas de cota de 170 e 180m. Começaram por ser adicionados os pontos junto ao paredão, com 18.5m de profundidade, e foram sendo adicionados pontos até à foz da ribeira do Enxoé na albufeira usando um declive constante. Em seguida foram adicionados os pontos batimétricos dos vários afluentes existentes na carta, sendo que o método de cálculo considerado foi o mesmo, ou seja a partir da profundidade da ribeira foram adicionados pontos batimétricos ao longo de um declive constante até à cota dos 180m (margens da albufeira).



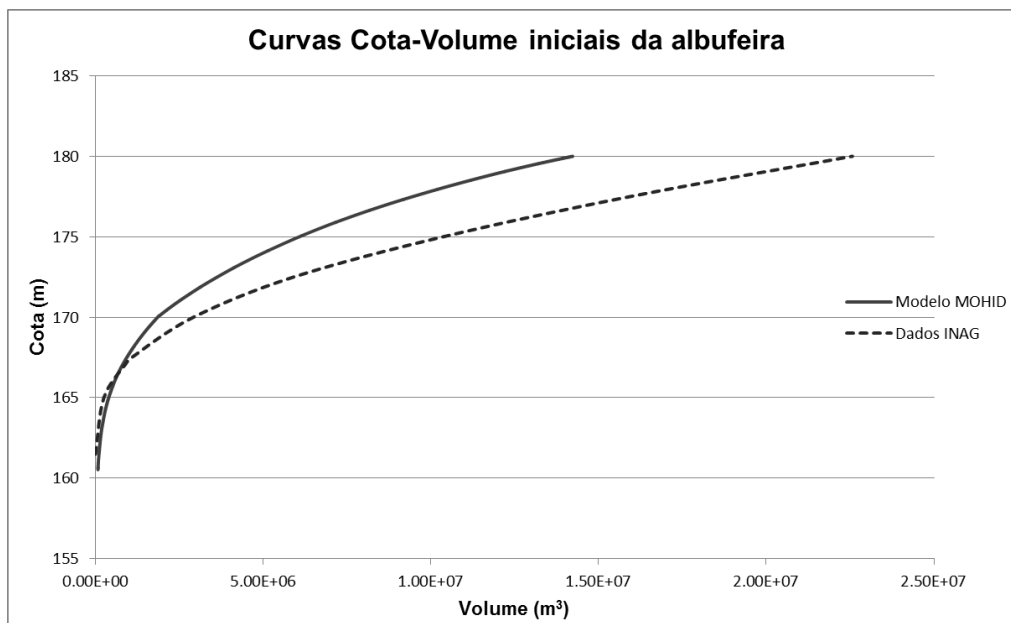
**Figura 7:** Representação das linhas e pontos de cota da albufeira do Enxoé.

A resolução da malha usada foi de 30x30m e o cálculo da batimetria foi feito com base numa interpolação linear com os pontos batimétricos criados, com o polígono de terra (que define a área delimitante da albufeira) e com a malha horizontal criada.

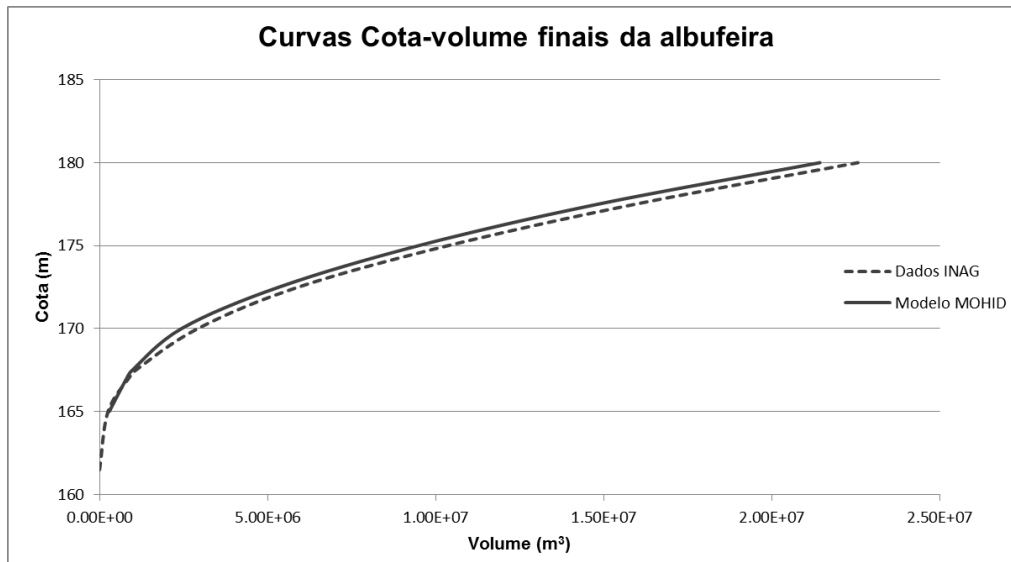
Após a conclusão da construção da batimetria, foi necessário ajustar a mesma à realidade da albufeira. Para tal foram comparadas as curvas de Cota-Volume real com a do modelo e feitos alguns ajustes de modo a que as curvas convergissem. O resultado final desta avaliação é apresentado na Figura 8, e as curvas de cota-volume nas figuras Figura 9 e Figura 10.



**Figura 8:** Representação da batimetria obtida por interpolação linear para a albufeira do Enxoé.



**Figura 9:** Curvas Cota-Volume obtidas pelo modelo com base na batimetria criada, e real obtida com base nas medições feitas pelo INAG, antes dos ajustes batimétricos.



**Figura 10:** Curvas Cota-Volume obtidas pelo modelo com base na batimetria criada, e real obtida com base nas medições feitas pelo INAG, após ajustes batimétricos.

### 3.4.2. Discretização vertical

Em termos de discretização vertical começaram por ser usadas camadas cartesianas no fundo, sendo estas caracterizadas por profundidades fixas construídas a partir do zero hidrográfico e até ao fundo, e com camadas harmónicas, que são idênticas às cartesianas mas com a possibilidade de expandir ou comprimir consoante o nível da água o que as torna mais úteis em reservatórios. As camadas cartesianas são adequadas para fluxos de água na horizontal, que se dá quando a pressão baroclínica é importante.

No entanto, os fluxos nunca são horizontais uma vez que a pressão nunca é puramente baroclínica ou puramente barotrópica, dependendo também de forças de inércia. Por essa razão, a melhor discretização vertical é aquela que evolui com a velocidade vertical e que pode ao mesmo tempo alterar a espessura das suas camadas assim como colapsar a coluna de água quando o nível é muito baixo.

O modelo final aplicado usa esta discretização vertical (em que as camadas se designam por “lagrangianas” e podem ter por base a forma cartesiana ou sigma), uma vez que são capazes de simular eficazmente a estratificação da coluna de água por evoluírem com a velocidade vertical e impedirem os fluxos verticais. Estes resultados serão apresentados em capítulos seguintes.

Em termos de discretização vertical, esta passou de 9 camadas, das quais 4 cartesianas no fundo e 5 harmónicas na superfície, para 10 camadas (6 camadas harmónicas ao invés das 5 da discretização anterior) e finalmente para 15 camadas lagrangianas com base cartesiana com espessuras que variam entre 0.5 metros na superfície e 3 metros no fundo. A definição destas novas camadas permitiu que o modelo mantivesse sempre uma camada mais fina à superfície durante todo o período simulado.

### **3.4.3. Forçamento atmosférico**

Todos os dados foram obtidos no SNIRH a partir das estações de monitorização presentes na albufeira e redondezas (até um raio de 30km a partir do centro da albufeira). Os dados relativos ao vento são médias diárias das máximas diárias (de modo a incluir rajadas) desde Maio de 2005 até Janeiro de 2013. Para a humidade e temperatura foram usadas médias diárias, e para a radiação, médias horárias.

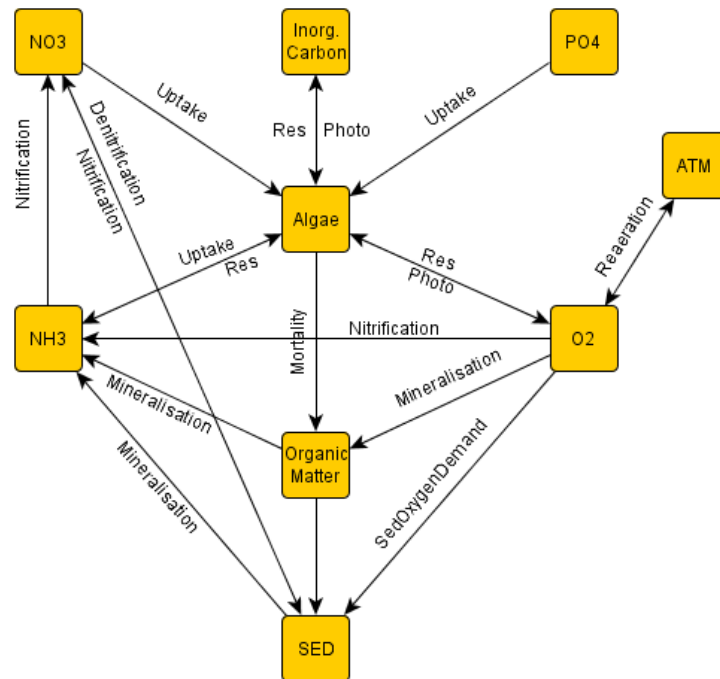
### **3.4.4. Entradas e saídas de água**

As entradas e saídas de água na albufeira do Enxoé são constituídas pelo balanço precipitação/evaporação, pela entrada de caudal da ribeira e pela saída pelo descarregador de fundo. Estes balanços foram obtidos através do modelo de bacias SWAT que fornecem o balanço entre a precipitação e a evaporação, e o caudal afluente da Ribeira do Enxoé, e são valores médios diários tanto de caudal como de nutrientes. Os caudais de saída pelo descarregador foram calculados usando a diferença entre o resultado líquido deste balanço e o nível da água medido e presente no SNIRH.

## 4. O modelo ecológico CEQUAL-W2

Como modelo ecológico foi utilizada a mesma base que o modelo CEQUAL-W2 integrado no modelo MOHID3D de modo a poder simular o crescimento das cianobactérias que não estão ainda incrementadas no modelo ecológico do MOHID.

Este modelo simula os processos biogeoquímicos como os ciclos do azoto, do fósforo, do carbono e do oxigénio, assim como a dinâmica das algas e da matéria orgânica como se pode ver na Figura 11.



**Figura 11:** Representação esquemática dos processos biogeoquímicos incluídos no modelo ecológico CEQUAL-W2 adaptado ao sistema MOHID.

Dentro da matéria orgânica estão incluídas as fracções LDOM (M.O. não refractária dissolvida), RDOM (M.O. refractária dissolvida), LPOM (M.O. não refractária particulada) e RPOM (M.O. refractária particulada) sendo que o modelo considera ainda a passagem da matéria particulada a dissolvida por meio de hidrólise. No que toca às algas, foram incluídas no modelo as clorofíceas e as cianobactérias uma vez que são as formas predominantes nas águas.

### 4.1. Equações do modelo

O cálculo das concentrações destas propriedades é feito com base numa filosofia de fontes e poços associados a cada célula do modelo de modo a conservar a massa, sendo que as equações utilizadas por este modelo podem ser consultadas em (Cole & Wells., 2003). Para o cálculo da evolução da concentração das espécies de algas consideradas neste trabalho, foram consideradas as suas taxas de crescimento máximo, respiração, excreção e mortalidade, assim como os factores limitantes do seu



crescimento, como a intensidade da luz, a concentração de nutrientes na água e a temperatura da água. O cálculo e calibração das constantes usadas na limitação pela luz e temperatura foram um dos grandes desafios deste trabalho uma vez que os valores utilizados determinam a dinâmica das algas ao longo do período estudado.

#### 4.1.1. Limitação pela temperatura

As equações 11, 12 e 13 representam o cálculo efectuado pelo modelo para a determinação do coeficiente TRM (*Temperature Rate Multiplier*) que, juntamente com os factores de limitação pela luz e pelos nutrientes condiciona a taxa de crescimento das algas. Nestas equações  $SK1$ ,  $SK2$ ,  $SK3$  e  $SK4$  representam as constantes (entre 0 e 1) para o controlo da curvatura da limitação da temperatura e  $TT$ ,  $TT1$ ,  $TT2$ ,  $TT3$  e  $TT4$  representam a temperatura da água e a temperatura mínima de crescimento, as temperaturas mínima e máxima do intervalo óptimo de crescimento e a temperatura máxima para haver crescimento, respectivamente. Uma descrição mais aprofundada do método de cálculo usado para incluir os factores de limitação é apresentada em (Cole & Wells., 2003).

$$Lam1 = SK1 \times EXP \left[ \frac{LN \left( \frac{SK2}{SK1} \times \frac{(1-SK1)}{(1-SK2)} \right)}{(TT2-TT1) \times (TT-TT1)} \right] \quad \text{Equação 11}$$

$$Lam2 = SK4 \times EXP \left[ \frac{LN \left( \frac{SK3}{SK4} \times \frac{(1-SK4)}{(1-SK3)} \right)}{(TT4-TT3) \times (TT4-TT)} \right] \quad \text{Equação 12}$$

$$LightLim = \frac{Lam1}{1+Lam1-SK1} \times \frac{Lam2}{1+Lam2-SK4} \quad \text{Equação 13}$$

#### 4.1.2. Limitação pela luz

A limitação pela luz é feita através das equações 14, 15, 16 e 17, em que  $Asat$  representa a intensidade de luz de saturação para a taxa máxima de fotossíntese da alga ( $W/m^2$ ),  $rad$  a radiação incidente ( $W/m^2$ ),  $Thickness$  a espessura da célula de cálculo (m), e  $gamma$  o coeficiente de extinção de luz na célula de cálculo ( $1/m$ ).

$$LightLim = 2.718282 \times \frac{[EXP(-lam2) - EXP(-Lam1)]}{gamma \times Thickness} \quad \text{Equação 14}$$

$$Lam1 = LTcoef \quad \text{Equação 15}$$

$$Lam2 = LTcoef \times EXP(-\gamma \times Thickness)$$

**Equação 16**

$$LTcoef = RAD / Asat$$

**Equação 17**

Estas equações mostram que a intensidade de saturação da luz é decisiva no comportamento das algas, nomeadamente ao longo das várias estações do ano. Os resultados do processo de calibração deste coeficiente e dos coeficientes utilizados no cálculo da limitação pela temperatura serão apresentados mais adiante neste relatório.

#### 4.1.3. Limitação por nutrientes

A limitação pelos vários nutrientes não foi estudada com detalhe neste trabalho, pelo que não será aqui apresentada, podendo ser consultada no manual do modelo CEQUAL-W2 (Cole & Wells., 2003).

## 4.2. Parametrização do modelo

O modelo ecológico nesta fase servirá apenas para reproduzir a dinâmica dos nutrientes e dos produtores primários uma vez que estes últimos são essenciais para a extinção da luz de modo a que esta não atinja o fundo e conseqüentemente aqueça toda a coluna de água. Caso isto acontecesse, a estratificação da coluna de água estaria comprometida e a temperatura tornar-se-ia homogénea em toda a coluna de água.

Foi considerada uma parametrização da extinção da luz que depende, em primeiro lugar, da extinção de luz pela água pura e, em segundo lugar, pelas concentrações de todo o material particulado como as algas, os sedimentos e a matéria orgânica particulada, sendo os factores de extinção para estas propriedades apresentados em seguida.

**Tabela 1:** Coeficientes de extinção de cada uma das propriedades da água.

<b>Propriedade</b>	<b>Coefficiente de extinção (m<sup>2</sup>/mg)</b>
Clorofíceas	0.2
Cianobactérias	0.2
Sedimentos	0.02
LPOM	0.01
RPOM	0.01
<b>Coefficiente de extinção para água pura (1/m)</b>	
0.7	

O método de cálculo para a extinção de luz de baixo comprimento de onda (*short wave radiation*) tem apenas em conta a extinção de luz devido à concentração das

propriedades como as algas, os sedimentos e a matéria orgânica particulada, sendo a equação definida por:

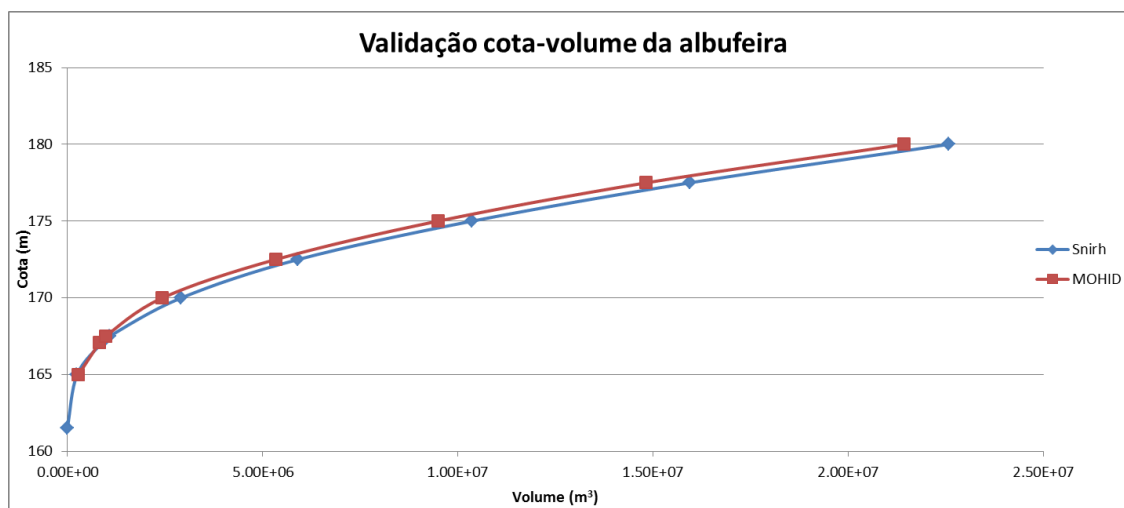
$$Rad \times e^{-\sum (coefExt \times C) \times Espessura} \quad \text{Equação 18}$$

Em que C é a concentração de uma propriedade e rad é a radiação incidente na superfície da água menos o albedo.

## 5. Resultados e discussão

Os resultados apresentados neste relatório são relativos apenas à hidrodinâmica e à capacidade do modelo de simular o fenómeno da estratificação da coluna de água que é o principal responsável pela falta de mistura nas albufeiras no período de verão.

A fase inicial do trabalho incluiu a construção e validação da batimetria. Para isso, a albufeira foi esvaziada no modelo e foi sendo registado o seu volume e a sua cota de modo a comparar com os valores presentes no SNIRH. O resultado desta comparação para a batimetria final é apresentado na Figura 12.



**Figura 12:** Comparação dos volumes e cotas calculados pelo modelo com os valores presentes no SNIRH.

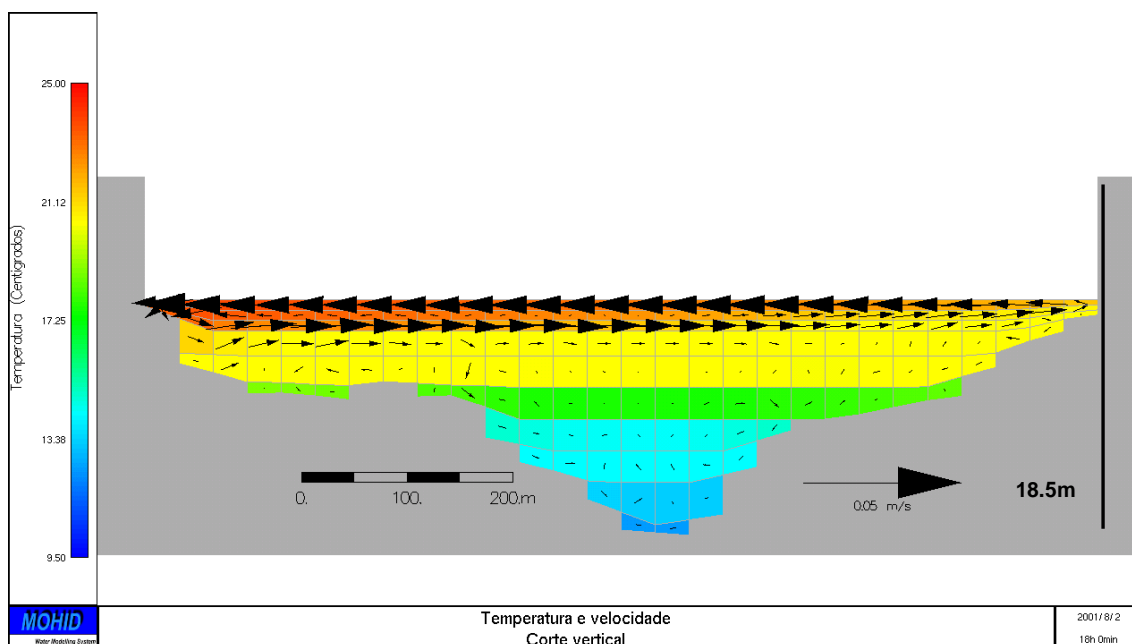
No que toca à discretização vertical, começaram por ser usadas camadas do tipo cartesianas (ver [http://wiki.mohid.com/wiki/index.php?title=Module\\_Geometry](http://wiki.mohid.com/wiki/index.php?title=Module_Geometry)) no fundo e harmónicas na superfície uma vez que apenas estas podiam colapsar quando o nível fosse demasiado baixo. No entanto verificou-se que com estas camadas não era possível obter uma estratificação da coluna de água, e a mistura constante das águas contribuiu para a homogeneização da temperatura.

As figuras seguintes representam os resultados obtidos para as velocidades e temperatura com a discretização vertical inicial considerando uma temperatura inicial homogénea ao longo da coluna de água de 10°C. As imagens são referentes ao estado da água 12 dias depois do início da simulação.

Nestas imagens, que são representativas da totalidade do período de simulação de cerca de um mês, mostram que não há estratificação da temperatura, mas sim um gradiente constante que decorre da mistura vertical constante e que transporta a temperatura para o fundo, até a um ponto em que a temperatura à superfície é igual à do fundo.

Já a utilização das camadas do tipo lagrangianas foi bastante eficaz na reprodução do processo de estratificação (Figura 14), em que se pode verificar que a temperatura, devido à radiação, aumenta apenas junto à superfície e apresenta um gradiente muito suave até cerca de 4 metros de profundidade, altura em que a começa a diminuir rapidamente.

Os casos apresentados até aqui são relativos à utilização das camadas ditas “lagrangianas” e que fornecem resultados bastante favoráveis no que toca à representação dos processos hidrodinâmicos associados a uma albufeira. Contudo, na fase do trabalho em que as camadas verticais usadas eram do tipo harmónico, os resultados eram significativamente diferentes, especialmente no que respeita ao fenómeno de estratificação, como se pode observar na Figura 13.

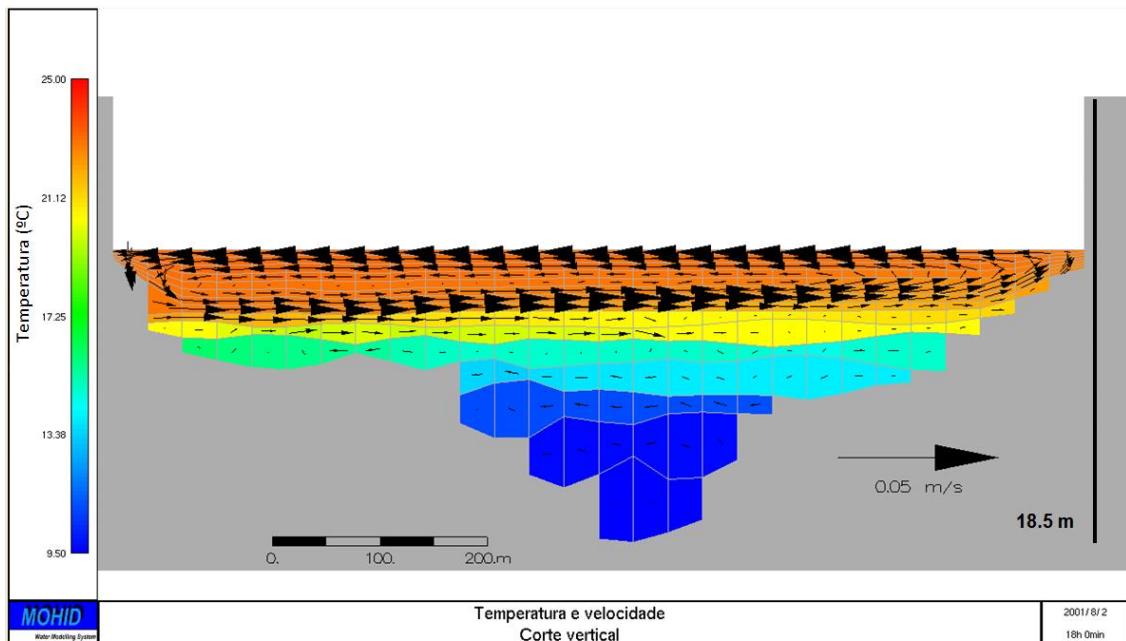


**Figura 13:** Representação das velocidades e temperatura da água em corte vertical realizado no mesmo local que o indicado na figura 4. Esta figura foi obtida com a utilização das camadas cartesianas e harmónicas e com cerca de 12 dias de simulação.

Em comparação com a Figura 14, os resultados obtidos utilizando camadas do tipo cartesianas no fundo e harmónicas à superfície sugerem que não existe uma estratificação da coluna de água. Observa-se que no fundo as temperaturas estão já a chegar perto de 13 graus celsius, em comparação com os constantes 10 graus verificados com a utilização das camadas “lagrangianas”.

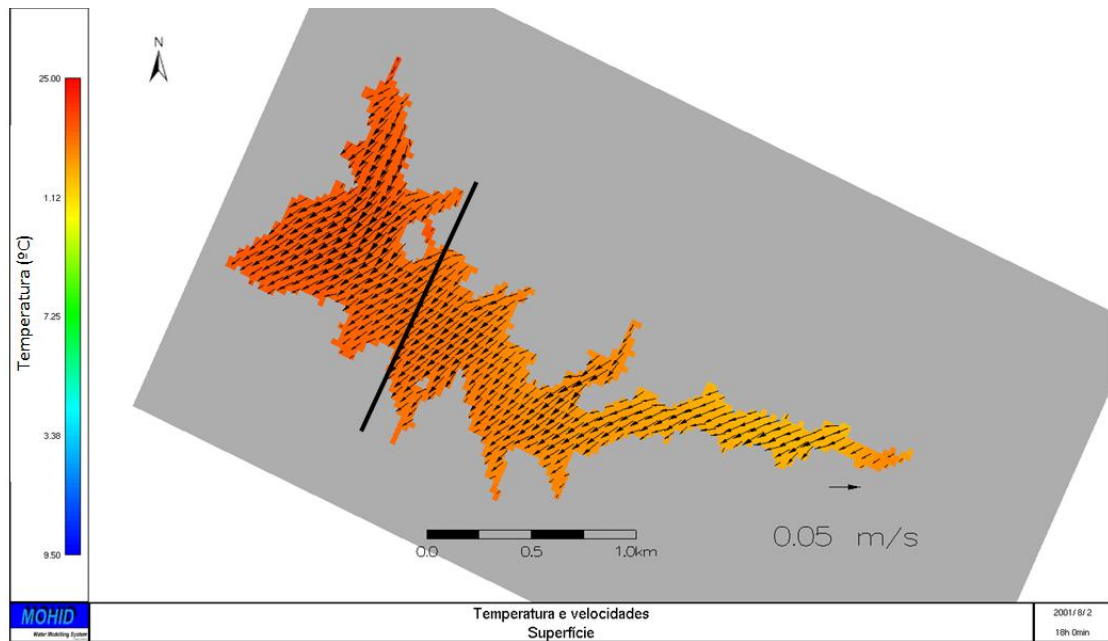
Ainda em relação às camadas, na Figura 13 estas não se alteram consoante as velocidades e por isso não se deformam e não produzem as ondas que se verificaram com a utilização das camadas “lagrangianas”. Assim, a coluna de água mistura-se

lentamente, até que cerca de 20 dias depois do início da simulação a temperatura é igual em toda a coluna de água.



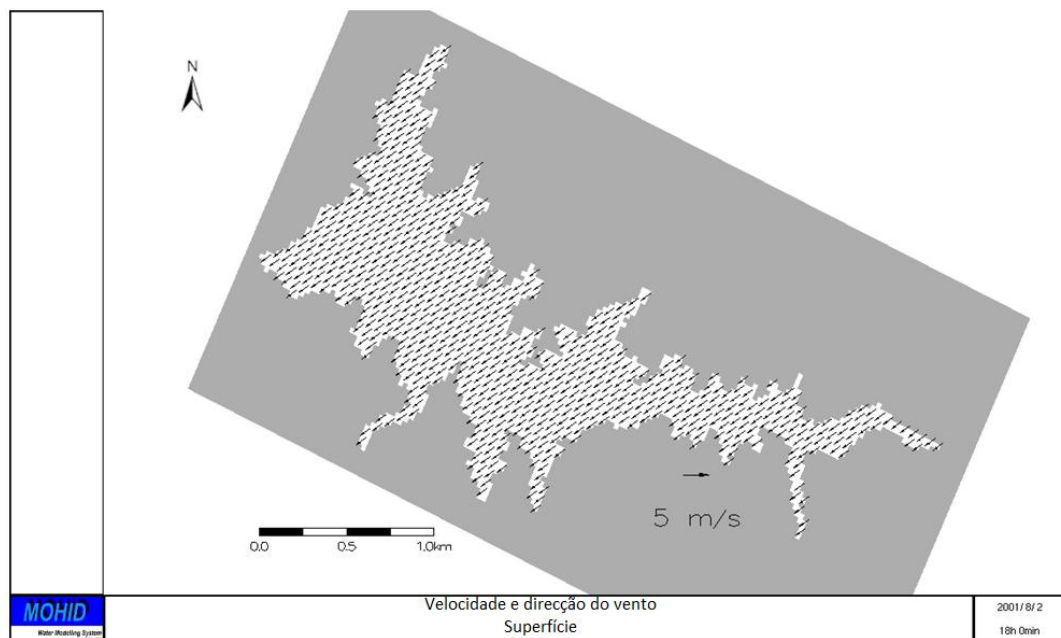
**Figura 14:** Representação de um corte vertical da albufeira a cerca de 600 metros da barragem, e em que se pode verificar o processo de estratificação da temperatura, resultado da utilização de camadas “lagrangianas” após cerca de 12 dias do início da simulação.

Esta diminuição da temperatura está inteiramente relacionada com o transporte quase nulo de temperatura na vertical, devido ao facto de as camadas forçarem a água a circular na horizontal, alterando para isso a sua espessura. Este movimento e mistura vertical observa-se muito bem na Figura 14, com o aparecimento de uma circulação de água de uma margem até à outra. Este movimento é especialmente devido ao vento e à ondulação a que este conduz, sendo que as camadas conseguem-se adaptar às velocidades verticais e cria as ondas que se podem ver na Figura 14, assim como a ausência de velocidades verticais a partir dos quatro metros de profundidade.



**Figura 15:** Representação da temperatura e das velocidades na camada de superfície da albufeira e a localização do corte vertical apresentado na Figura 14.

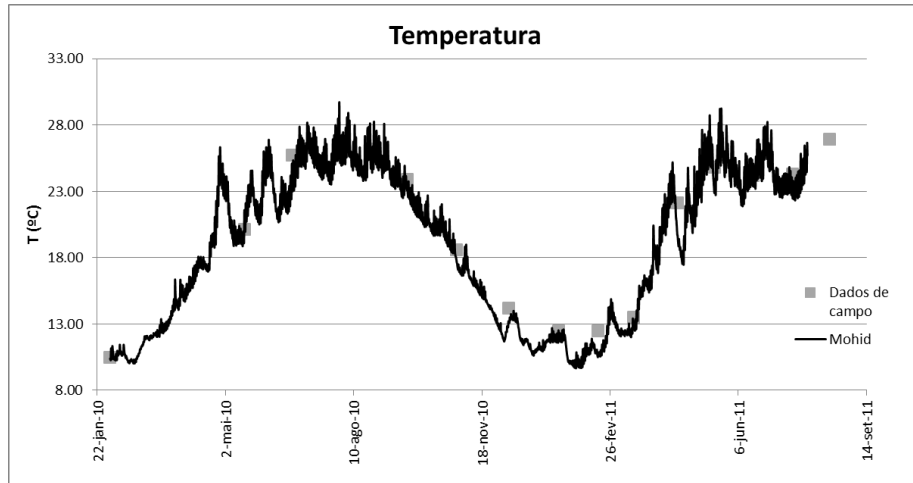
A Figura 15 mostra que a circulação da água nos primeiros quatro metros de profundidade é devida às correntes de superfície associadas à direcção do vento, que neste caso era de Norte, puxando a água do fundo na fronteira de terra mais a Norte e empurrando para o fundo a água da fronteira de terra mais a Sul.



**Figura 16:** Representação da velocidade e direcção do vento.

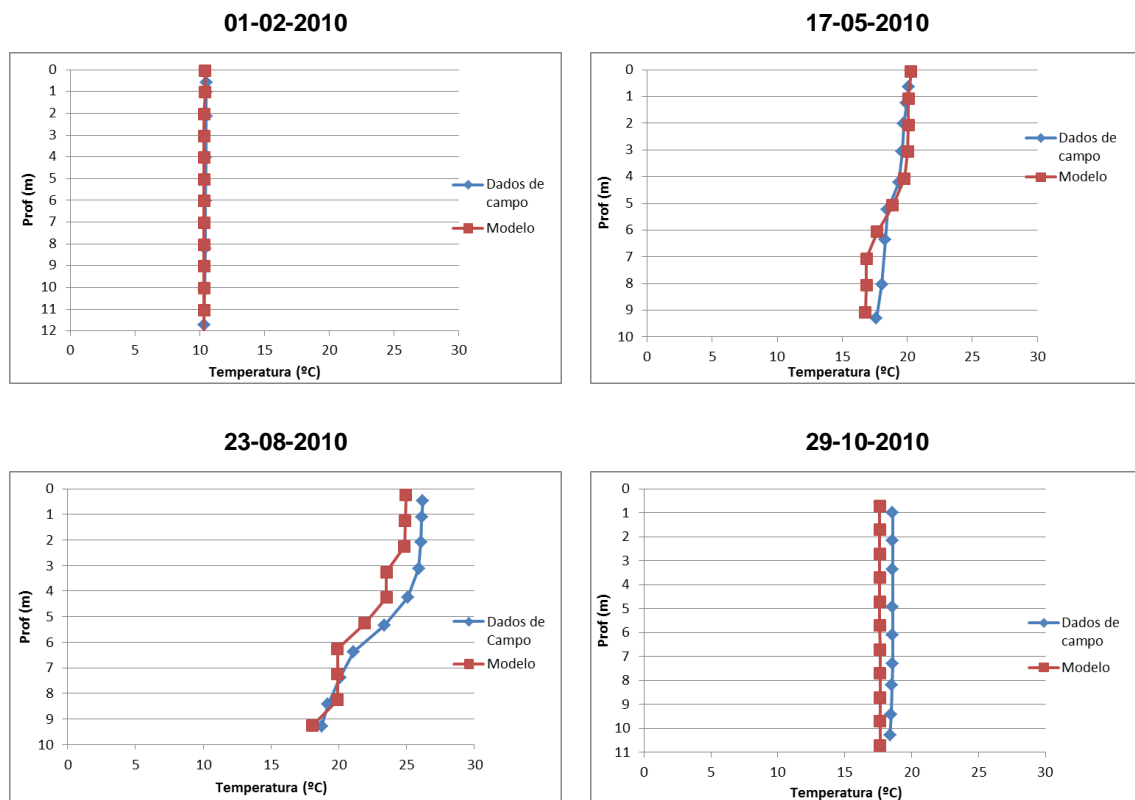
## 5.1. Hidrodinâmica

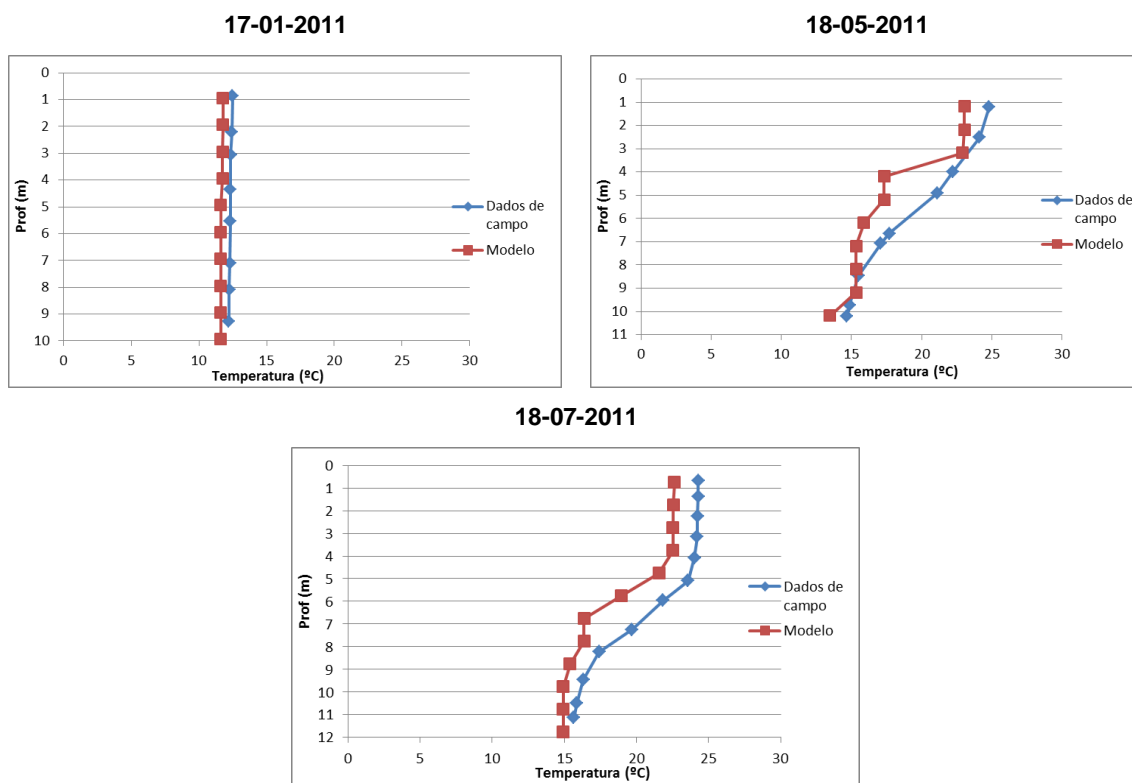
Os resultados relativos à temperatura à superfície junto ao paredão para o período de 2010/2011 e os perfis em profundidade são apresentados e comparados com valores medidos de temperatura de modo a validar os processos hidrodinâmicos da albufeira.



**Figura 17:** Evolução da temperatura simulada pelo modelo e medida em campanhas, ao longo do período 2010-2011.

Na Figura 17 pode-se observar que o modelo acompanha bem as medições da temperatura durante todo o período simulado, incluindo a variabilidade sazonal. Para validar o modelo hidrodinâmico é ainda necessário analisar o comportamento da temperatura em profundidade e ao longo do período simulado.





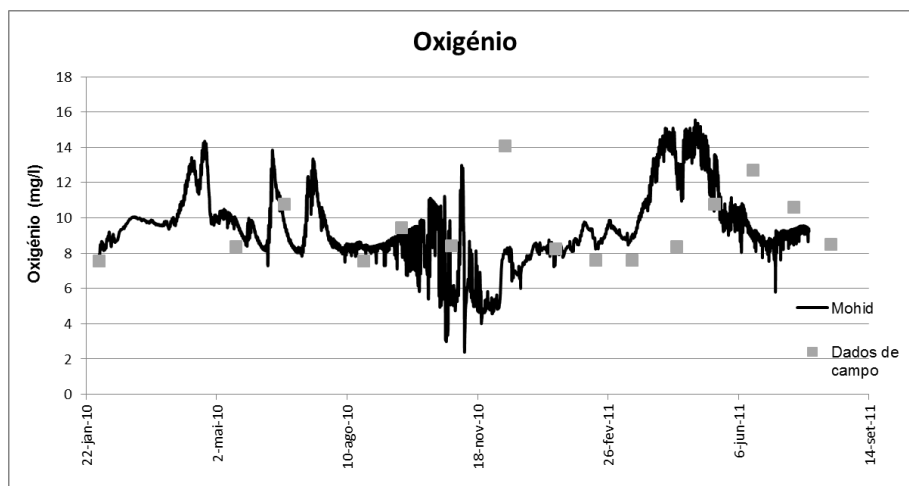
**Figura 18:** Comparação entre os perfis de temperatura simulados pelo modelo e os perfis medidos pela Universidade de Évora. Os resultados obtidos pelo modelo ajustam-se correctamente aos valores medidos.

De acordo com estes perfis o modelo foi eficaz na simulação dos processos hidrodinâmicos como a estratificação da temperatura em meses de verão e homogeneidade nos meses de inverno.

## 5.2. Processos biogeoquímicos

Os principais intervenientes nos processos biogeoquímicos simulados pelo modelo CEQUAL-W2 são o oxigénio, o nitrato, o fosfato e as algas (nesta parametrização as clorófitas e as cianobactérias).

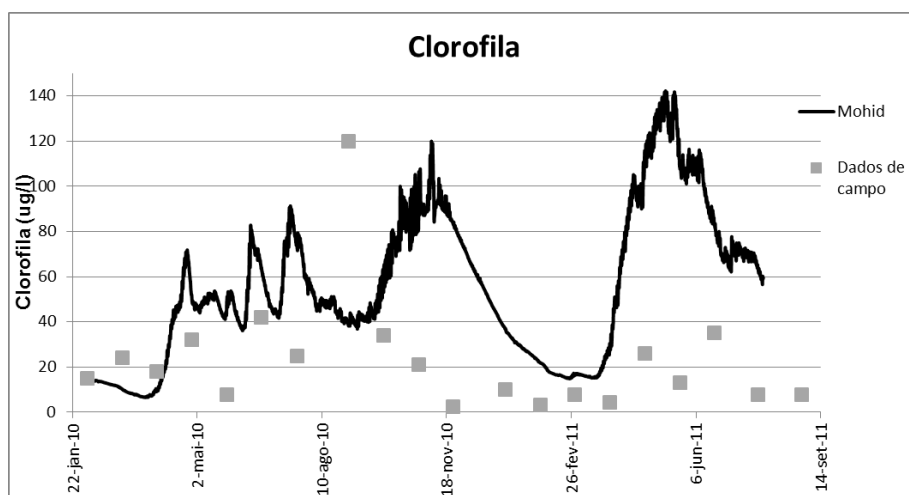




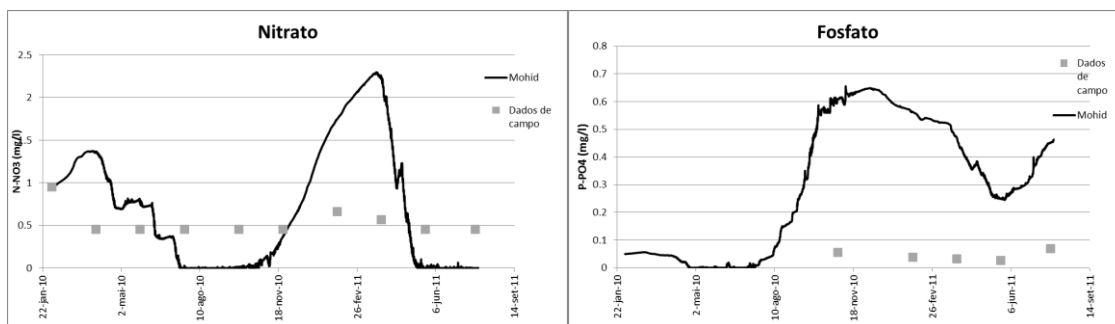
**Figura 19:** Evolução da concentração de oxigênio simulado pelo modelo e medido em campanhas, ao longo do período 2010-2011.

A evolução da concentração do oxigênio é apresentada na Figura 19. Verifica-se que a água da albufeira junto ao paredão esteve sempre com níveis normais de oxigênio, entre 7 e 12 mg/l, tanto no caso do modelo como nos dados de campo com exceção do final do verão de 2010 – redução dos níveis de oxigênio para 3mg/l – e do período de Abril-Junho de 2011 – aumento da concentração até 14 mg/l. À excepção destes períodos o modelo acompanhou correctamente a evolução da concentração de oxigênio.

No caso da clorofila (Figura 20) verificou-se que o crescimento das algas neste período foi excessivo quando comparado com os valores medidos, o que explica o pico de oxigênio observado. A redução rápida dos níveis de oxigênio durante o mês de Outubro de 2010 deve-se à elevada variabilidade da clorofila no mesmo período e, sendo o final do período de verão, é esperado que o oxigênio abaixo da superfície esteja já quase esgotado.

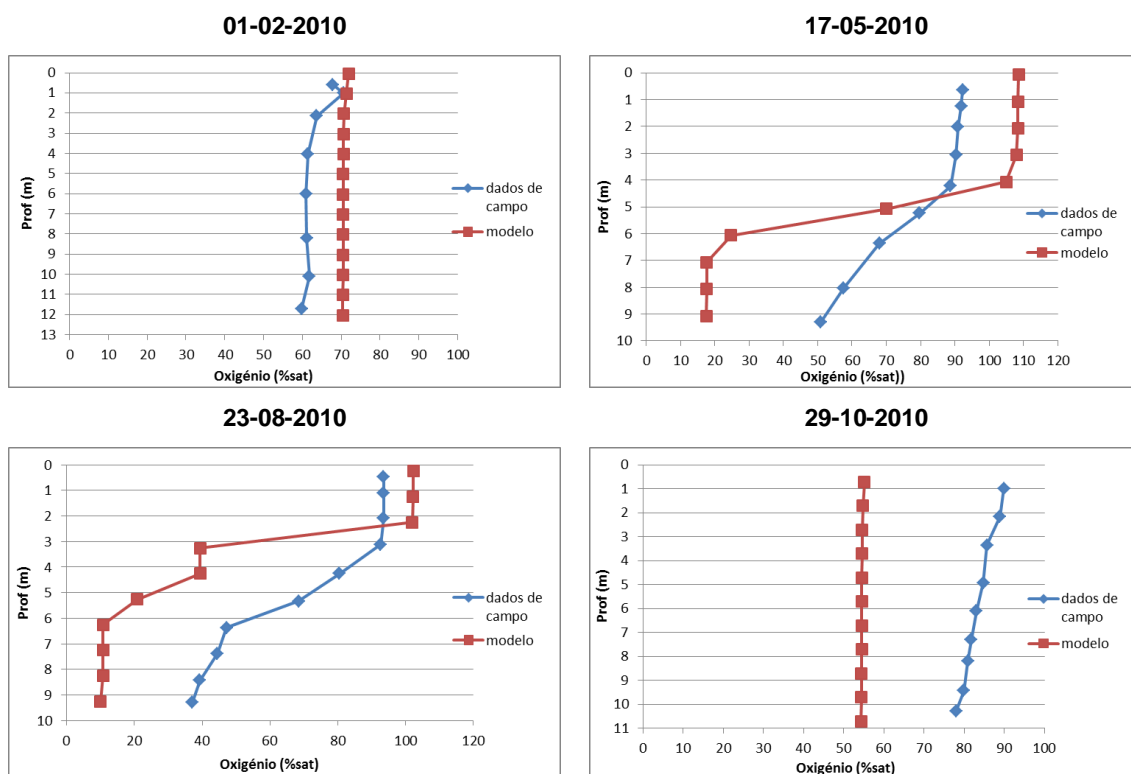


**Figura 20:** Evolução da concentração de clorofila simulada pelo modelo e medida em campanhas, ao longo do período 2010-2011.



**Figura 21:** Evolução das concentrações de nitrato e fosfato simulados pelo modelo e medidos em campanhas, ao longo do período 2010-2011.

Como consequência da mineralização associada ao declínio rápido da clorofila em Novembro de 2010, a concentração de oxigénio aumentou até cerca de 2 mg/l. No entanto a concentração de fosfato começou a aumentar logo em Agosto e a um ritmo elevado - passando de cerca de 0.05 mg/l para 0.6 mg/l três meses depois – devido à libertação dos sedimentos (assumiu-se uma libertação máxima de fosfato de  $7.5 \times 10^{-5}$  kg/m<sup>2</sup>.dia). Uma vez que a concentração de fosfato atingiu estes níveis, o nutriente limitante passou a ser nitrato apresentando uma variabilidade que não foi registada nas campanhas. O aumento do valor do pico de concentração da clorofila no ano de 2011 foi então gerado pela quantidade excessiva de fosfato.



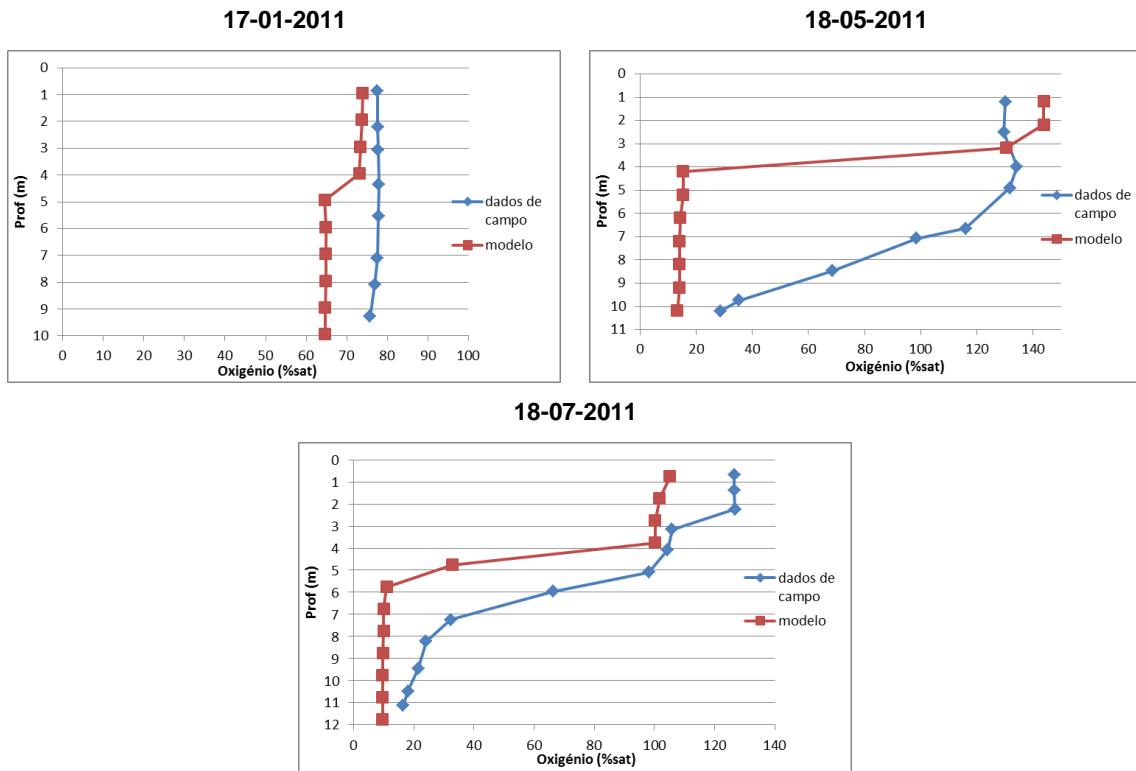
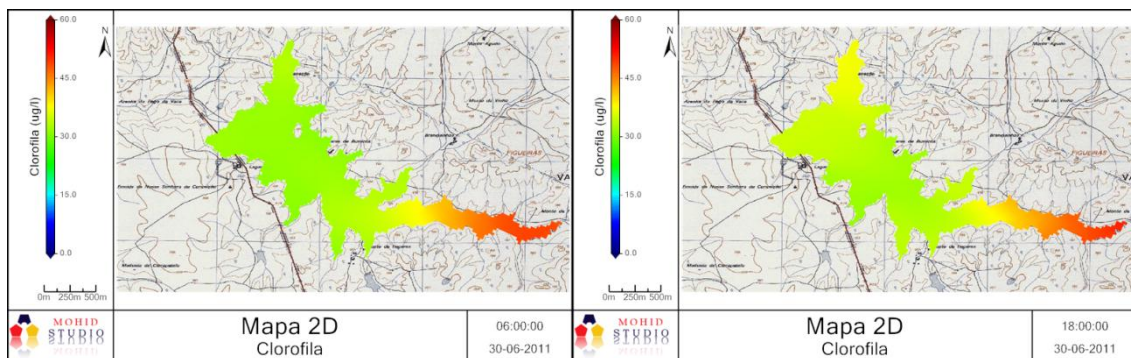


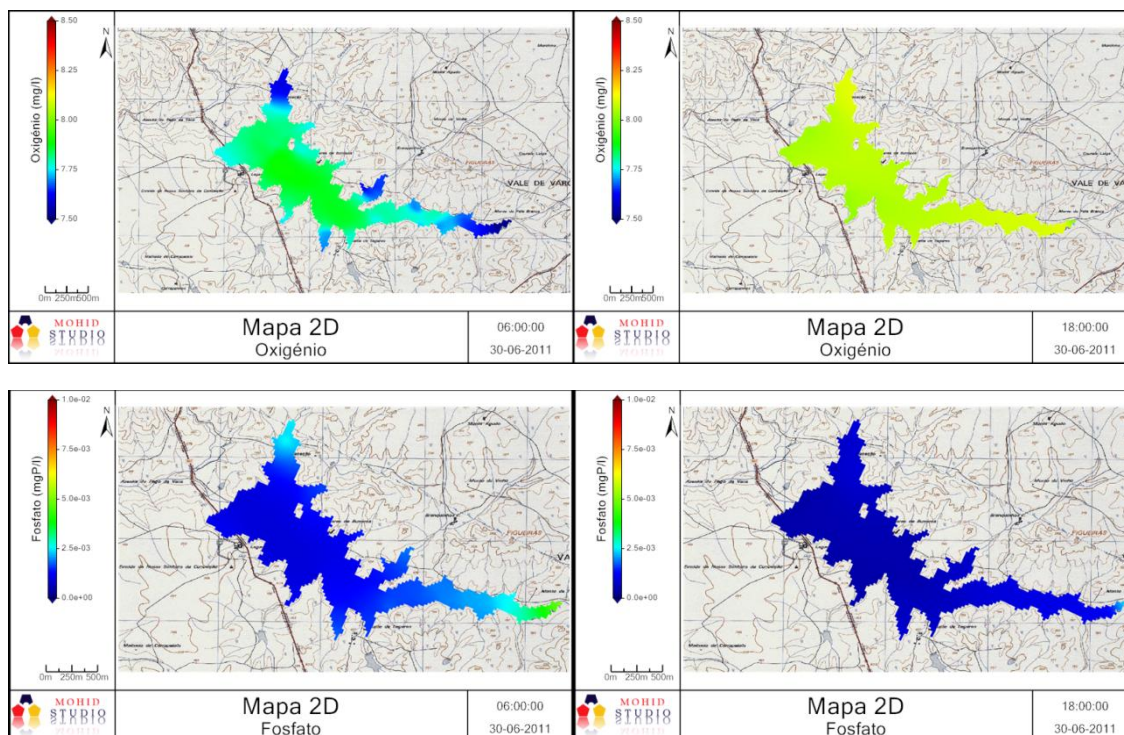
Figura 22: Comparação entre os perfis de oxigénio simulados pelo modelo e os perfis medidos pela Universidade de Évora.

De modo a corrigir esta dinâmica foram criados dois cenários para o período de 2011 inicializados por dados medidos no início de Fevereiro. O primeiro considerou a mesma parametrização considerada no período 2010-2011 enquanto o segundo incluiu a alteração da constante de semi-saturação de azoto para as clorofíceas de 0.014 mg/l para 0.1 mg/l, a alteração do intervalo óptimo da temperatura de modo a que as algas crescessem mais cedo (início de Março) e a redução da quantidade de fosfato libertado pelo fundo em cerca de 7 vezes – para  $1.0 \times 10^{-5}$ .

### 5.2.1. Mapas 2D à superfície

Para validar a hipótese de que a libertação de fosfato foi responsável pelo aumento da concentração de clorofila geraram-se mapas 2D à superfície para diferentes horas de um dia.





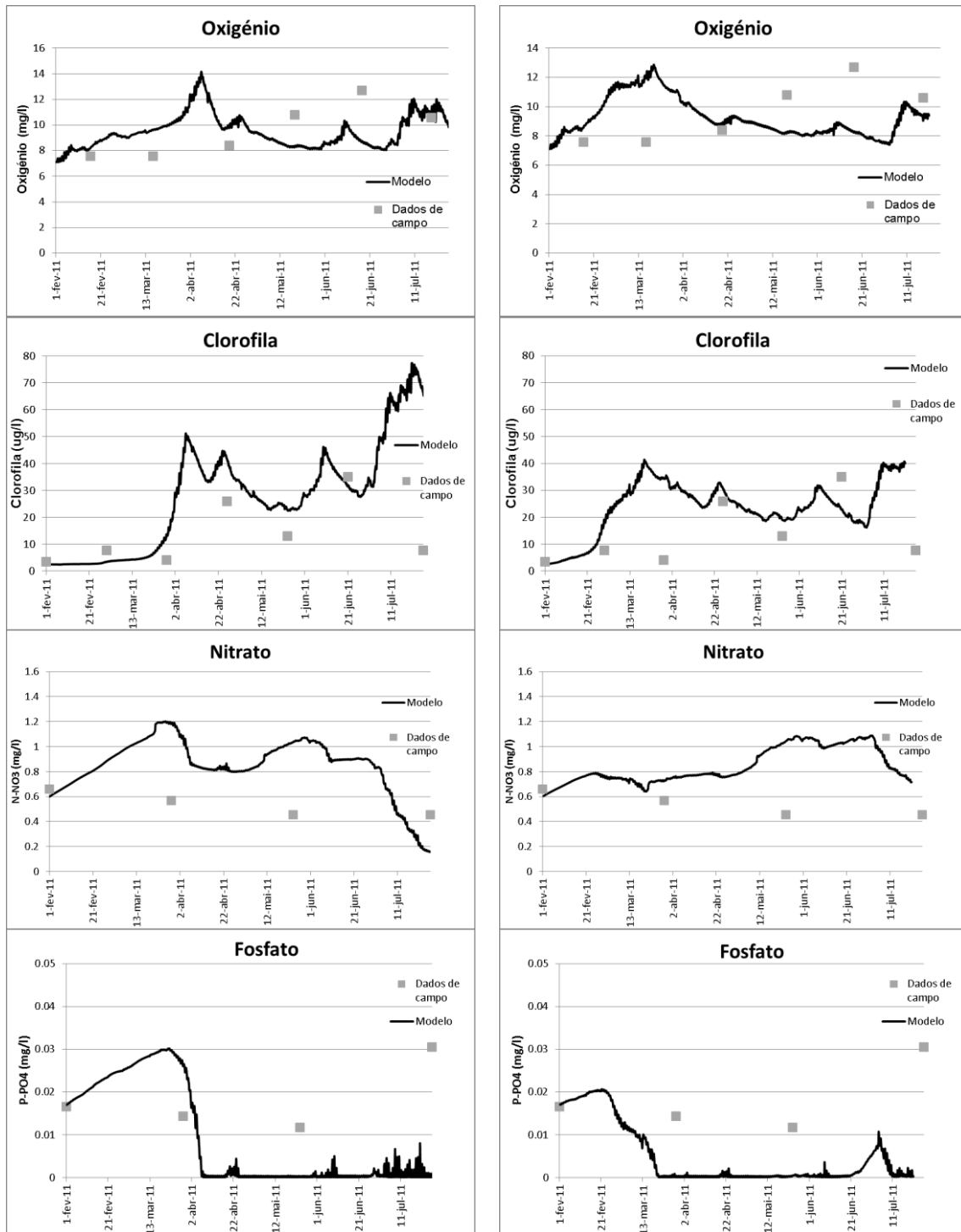
**Figura 23:** Representação espacial das concentrações de clorofila, oxigénio e fosfato na albufeira. Observam-se concentrações de clorofila mais elevadas durante a tarde junto à cabeceira e junto às margens onde a profundidade é mais baixa. O oxigénio segue esta mesma tendência uma vez que é produzido pela fotossíntese e o fosfato apresenta a tendência inversa – é produzido durante a noite e consumido durante o dia.

Como mostram os mapas (Figura 23), durante a noite a concentração de clorofila baixa e atinge um mínimo ao início da manhã. Esta diminuição está associada à ausência da luz, sendo que durante este período a concentração de nutrientes aumenta – pela mineralização da matéria orgânica e da libertação pelo fundo – particularmente a profundidades mais baixas, como na cabeceira e nas margens. O mesmo acontece ao oxigénio que é consumido durante a noite e começa a ser produzido a meio da manhã quando a fotossíntese compensa os processos de respiração.

## 5.2.2. Comparação entre cenários

### 5.2.2.1. Séries de superfície

Em seguida apresentam-se as séries temporais de superfície junto ao paredão para os cenários 1 e 2 de modo a avaliar as alterações feitas nos processos biogeoquímicos.



**Figura 24:** Comparação entre as séries temporais à superfície obtidas no cenário 1 (esquerda) e cenário 2 (direita) para: oxigénio; clorofila; nitrato e fosfato.

O aumento da constante de semi-saturação de azoto levou a uma diminuição da concentração de clorofila durante o período simulado e também os valores dos picos de concentração (Figura 24) em termos médios. No entanto, o início do crescimento rápido do fitoplâncton deu-se mais cedo devido à alteração do intervalo óptimo de crescimento. A diminuição do valor médio da concentração deve-se ao facto de o fitoplâncton não poder (neste cenário) usar exaustivamente o nitrato existente. Esta diminuição gera consumos menores de fosfato – reduzindo a quantidade de fosfato libertado do fundo – enfraquecendo a sua influência em relação ao total que entra na

albufeira (de 91% no primeiro cenário para 60% no cenário 2). No entanto o fosfato à superfície continua a esgotar-se devido ao valor usado para a constante de semi-saturação – 0.003 mgP/l – que permite que o fitoplâncton cresça mesmo para concentrações baixas.

### 5.2.2.2. Perfis verticais no paredão

Nesta secção são apresentadas as comparações entre perfis obtidos para os cenários 1 e 2 com os perfis medidos pela Universidade de Évora durante o período de Fevereiro de 2010 a Agosto de 2011.

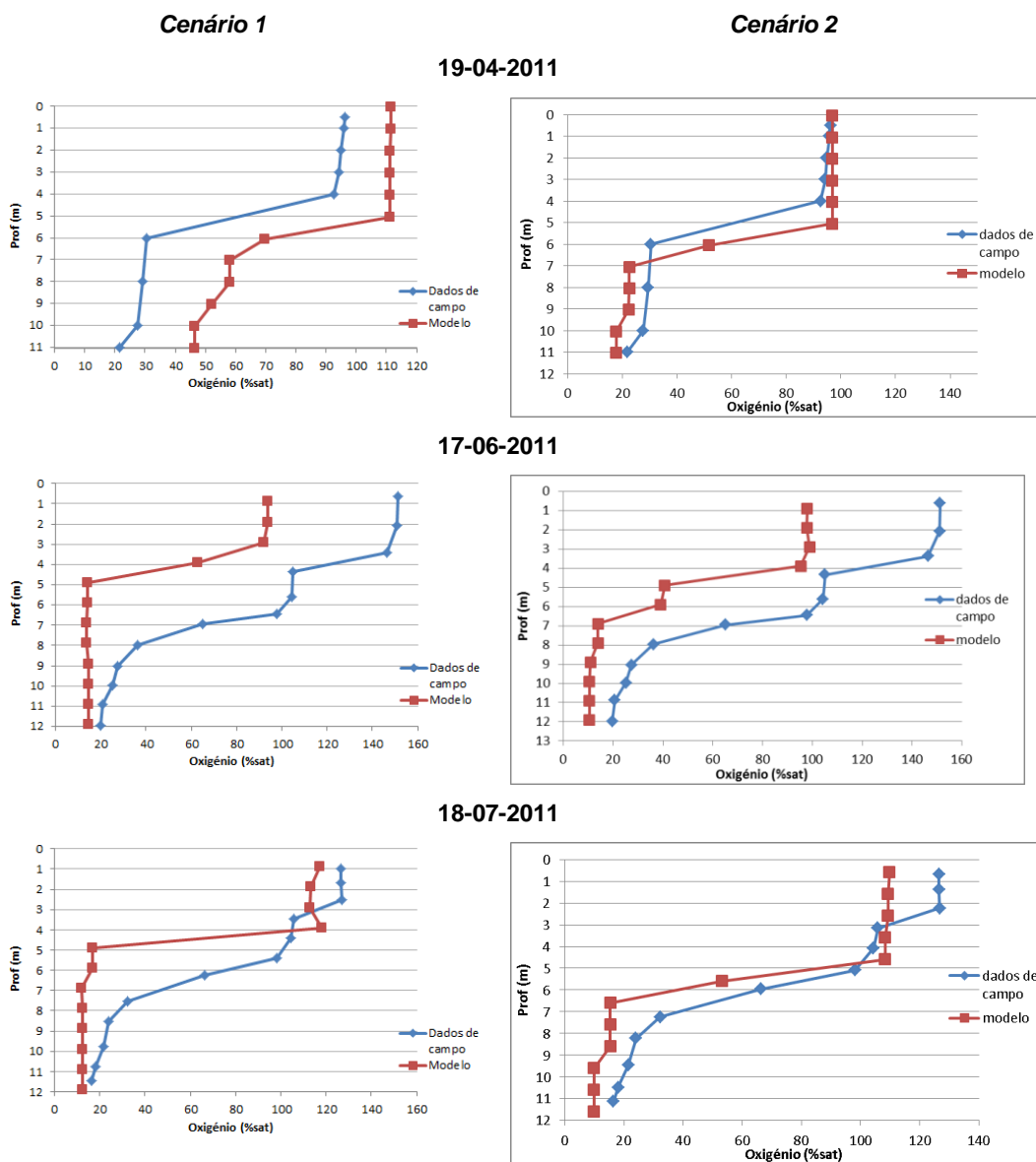


Figura 25: Comparação entre os perfis de oxigénio obtidos pelo cenário 1 (esquerda) e 2 (direita).

No caso do oxigénio os perfis obtidos tanto pelo modelo como pelas medições de campo mostram que há de facto estratificação da coluna de água nos meses de verão devido ao consumo elevado de oxigénio abaixo da termoclina. No entanto as concentrações obtidas pelo modelo são em geral mais baixas – 10-15% no fundo – mas tal é difícil de validar devido a possíveis erros nas medições.

## **6. Conclusões**

Pode-se concluir deste trabalho que o modelo tri-dimensional MOHIDWater3D tem agora a capacidade de simular eficazmente a estratificação da coluna de água de uma albufeira o que permitiu assim simular mais eficazmente os processos biogeoquímicos da albufeira do Enxóe.

A criação de um novo tipo de camadas verticais foi determinante para a obtenção destes resultados sugerindo por isso que estas camadas, designadas de “lagrangianas”, devam ser usadas sempre que seja necessário simular albufeiras e corpos de água fechados onde o vento induz uma turbulência à superfície que tem de ser dissipada maioritariamente à superfície, sendo necessárias forças do vento mais intensas para misturar a água do fundo, algo que acontecerá principalmente nos períodos de Inverno.

Em termos de qualidade da água foi possível concluir que os processos biogeoquímicos na coluna de água da albufeira são largamente influenciados pela libertação de fosfato do fundo, que é a fonte mais importante deste nutriente na albufeira.

## 7. Bibliografia

- Abbott, M., Damsgaard, A., & Rodenhuis, G. (1973). System 21, Jupiter, a design system for two dimensional nearly horizontal flows. *J. Hyd. Res*, pp. 1-28.
- Arawaka, A., & Lamb, V. (1977). Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Monthly Weather Review*, pp. 2293–2315.
- Coelho, H. S., Neves, R. R., Leitão, P. C., Martins, H., & Santos, A. P. (1998). The slope current along the western European margin: A numerical investigation. *BOLETÍN INSTITUTO ESPAÑOL DE OCEANOGRAFÍA*, pp. 61-72.
- Cole, T. M., & Wells, S. A. (2003). *CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.2*. Instruction Report EL-03-1, US Army Engineering and Research Development, Vicksburg, MS.
- Thomas, L. (1949). *Elliptic Problems in Linear Differential Equations over a Network*. Watson Sci. Comput. Lab Report, Columbia University, New York.
- Trancoso, A., Saraiva, S., Fernandes, L., Pina, P., Leitão, P., & Neves, R. (2005). Modelling macroalgae using a 3D hydrodynamic-ecological model in a shallow, temperate estuary. *Ecological Modelling*, pp. 232–246.
- Vaz, N., Dias, J., Leitão, P., & Martins, I. (2005). Horizontal patterns of water temperature and salinity in an estuarine tidal. *Ocean Dynamics*, 55, pp. 416-425.