

# FERRAMENTA DE MODELAÇÃO DESENVOLVIDA EM AMBIENTE WEB PARA APOIO À GESTÃO DE ALBUFEIRAS

José L.S. PINHO<sup>(1)</sup>; José M. P. VIEIRA<sup>(2)</sup>; Rui P. PINHO<sup>(3)</sup>; José M. ARAÚJO<sup>(4)</sup>

## RESUMO

A utilização das tecnologias de informação e comunicação no caso específico da gestão de recursos hídricos, em que a incerteza associada aos processos hidrológicos determina um grau de dificuldade acrescido, revela-se essencial. Desta forma, o desenvolvimento de ferramentas que permitam a consulta de dados de redes de monitorização hidrológica, de previsões meteorológicas e de resultados de simulação em ambientes de múltiplas plataformas, fixas ou móveis, é uma das tarefas fundamentais para a incorporação das tecnologias de informação nos processos correntes de gestão de recursos hídricos. No presente trabalho apresenta-se uma ferramenta, desenvolvida para ambiente *web*, que permite consultar informação e operar modelos hidráulicos de simulação de barragens e respetivas albufeiras. A interface é adaptável a cada caso de estudo e poderá ser desenvolvida com diferentes tipos de *software* de modelação hidrológica e hidrodinâmica, considerando as necessidades estabelecidas pelo conjunto dos seus utilizadores. A partir da interface é possível estabelecer as condições de fronteira definidas para cada modelo, aplicar o modelo e visualizar os resultados de simulações dinâmicas. A aplicabilidade da ferramenta desenvolvida é demonstrada em exemplos de implementação em diversas albufeiras situadas no rio Guadiana (Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva, Portugal).

**Palavras-chave:** tecnologias de informação, gestão de albufeiras, modelação hidrológica, ferramentas web

---

<sup>1</sup> Professor Auxiliar, Universidade do Minho, 4704-553 Braga, [jpinho@civil.uminho.pt](mailto:jpinho@civil.uminho.pt)

<sup>2</sup> Professor Catedrático, Universidade do Minho, 4704-553 Braga, [jvieira@civil.uminho.pt](mailto:jvieira@civil.uminho.pt)

<sup>3</sup> MSc Engenharia Informática, Universidade do Minho, 4704-553 Braga, [rppinho@civil.uminho.pt](mailto:rppinho@civil.uminho.pt)

<sup>4</sup> MSc Engenharia Urbana, Universidade do Minho, 4704-553 Braga, [jms\\_araujo@civil.uminho.pt](mailto:jms_araujo@civil.uminho.pt)

## 1 INTRODUÇÃO

As ferramentas de modelação utilizadas pelos atores envolvidos no processo de gestão de recursos hídricos, devem ser simples, amigáveis e robustas. Borowski e Hare (2007) afirmam que os responsáveis pela gestão da água mostram forte interesse na utilização de ferramentas integradas de modelação no desenvolvimento das suas atividades. Salientam, no entanto, que a falta de tempo para formação sobre o uso de sistemas complexos e os custos de *software* e *hardware* constituem obstáculos que dificultam a implementação e utilização destas ferramentas nas instituições responsáveis pela gestão da água.

A elevada complexidade do ciclo hidrológico conduziu, nos últimos anos, a uma abordagem especializada no desenvolvimento das diferentes ferramentas de modelação, no que se refere aos meios hídricos e às escalas espaciais e temporais dos processos modelados. Surge, assim, a necessidade de criação de plataformas tecnológicas de modelação, que têm necessariamente que considerar a inclusão de diferentes tipos de modelos, como modelos hidrológicos, modelos hidrodinâmicos e modelos de qualidade da água (Lindim et al., 2010), ferramentas de base de dados e interfaces amigáveis com o utilizador.

Na gestão operacional de albufeiras poderão ser utilizadas técnicas avançadas de controlo das estruturas hidráulicas baseadas em ferramentas de otimização (Ackermann et al., 2000; van Overloop, 2006) com o aumento da eficácia das medidas operacionais adotadas.

Uma das técnicas mais atrativas é o controlo preditivo (Rijo, 2010; Fielding et al.; 2010, Schawanenberg et al., 2013). As principais componentes desta técnica são: (i) um modelo do processo físico para prever trajetórias futuras das variáveis controladas ao longo de um determinado horizonte temporal, (ii) a cálculo de uma solução de controlo a partir de técnicas de otimização e (iii) uma estratégia de atualização das operações de controlo. Esta última implica que em cada instante em que é realizada a previsão se adote a solução de controlo obtida para o primeiro instante da sequência de controlo e se avance com um passo de tempo na sequência do procedimento. Este funciona num ciclo aberto e contínuo em que a disponibilidade de informação hidrométrica e meteorológica pode ser utilizada de forma eficaz na previsão das trajetórias de controlo desde que aquela informação esteja disponível na plataforma informática utilizada.

No presente artigo apresenta-se uma aplicação, desenvolvida para ambiente *Web*, que permite operar modelos de simulação de albufeiras e respetivas barragens. A aplicação é adaptável a cada problema que poderá ser desenvolvido com diferentes tipos de *software* de modelação hidrodinâmica, considerando as necessidades estabelecidas pelo conjunto dos seus utilizadores. A partir das suas interfaces é possível estabelecer as condições de fronteira definidas para cada modelo, executar o modelo e visualizar os resultados de simulações dinâmicas. Apresentam-se as características da plataforma hidroinformática desenvolvida que inclui um servidor de base de dados, um servidor *WWW*, *software* de modelação hidrológica e hidrodinâmica e uma tecnologia de representação gráfica adequada a ambientes *WWW*.

A ferramenta desenvolvida foi aplicada em várias albufeiras portuguesas, nomeadamente nas bacias hidrográficas dos rios Cávado, Ave e Guadiana. No presente trabalho a sua

utilização é ilustrada com exemplos de albufeiras do rio Guadiana (Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva).

## 2 MODELOS UTILIZADOS

### 2.1 Hidrologia

As afluições a uma determinada albufeira podem ser simuladas recorrendo-se a um modelo hidrológico da respetiva bacia hidrográfica. Num contexto de controlo e gestão em tempo real, este modelo adquire uma relevância fundamental pois permitirá adotar as estratégias de gestão mais adequadas, desde que, como anteriormente referido, se utilizem técnicas preditivas de controlo, podendo as afluições ser consideradas nesses procedimentos com base em previsões de precipitações disponibilizadas para a área de interesse.

O modelo hidrológico de Sacramento (Araújo et al., 2008), um dos modelos hidrológicos disponíveis no *software* Sobek, permite quantificar o escoamento instantâneo total utilizando como dados de entrada a precipitação média na bacia e a evapotranspiração.

Neste modelo (Figura 1) o solo é dividido em duas camadas principais: (i) a camada superior na qual ocorrem os processos rápidos junto à superfície do solo: evaporação, percolação, escoamento superficial e escoamento sub-superficial; (ii) a camada inferior em que ocorrem os processos lentos da região não saturada do solo: transpiração, recarga do aquífero e escoamento de base.

Em ambas as camadas são consideradas duas sub-camadas: uma onde a água está sob efeito da tensão superficial (capilaridade) e outra onde se encontra sob efeito da pressão hidrostática (água livre). O mecanismo de funcionamento do modelo pode ser resumido do seguinte modo: a água é armazenada numa determinada porção da coluna do solo como água sob tensão superficial até que a capacidade deste reservatório seja atingida. A partir daí, toda a água adicionada ao sistema será armazenada como água livre.

O volume de água sob tensão superficial só pode ser diminuído através de evaporação ou transpiração, enquanto a água livre também sofre decaimento devido à percolação da camada superior para a camada inferior, escoamento sub-superficial, escoamento de base e recarga do aquífero.

O caudal instantâneo total é composto por fluxos provenientes de processos nas sub-camadas de água livre das camadas superior e inferior: (i) escoamento direto proveniente da chuva que cai sobre a fração impermeabilizada da bacia, apresentando uma resposta hidrológica à escala de horas; (ii) escoamento superficial proveniente da chuva quando a camada superior do solo estiver saturada, apresentando uma resposta hidrológica à escala de horas; (iii) escoamento sub-superficial função do grau de saturação parcial da sub-camada de água livre da camada superior, apresentando uma resposta hidrológica à escala de dias; (iv) escoamento de base primário proveniente da sub-camada de água livre primária da camada inferior, apresentando uma resposta hidrológica à escala de semanas ou meses; (v) escoamento de base suplementar proveniente da sub-camada de água livre suplementar da camada inferior, apresentando uma resposta hidrológica à escala de dias a semanas.

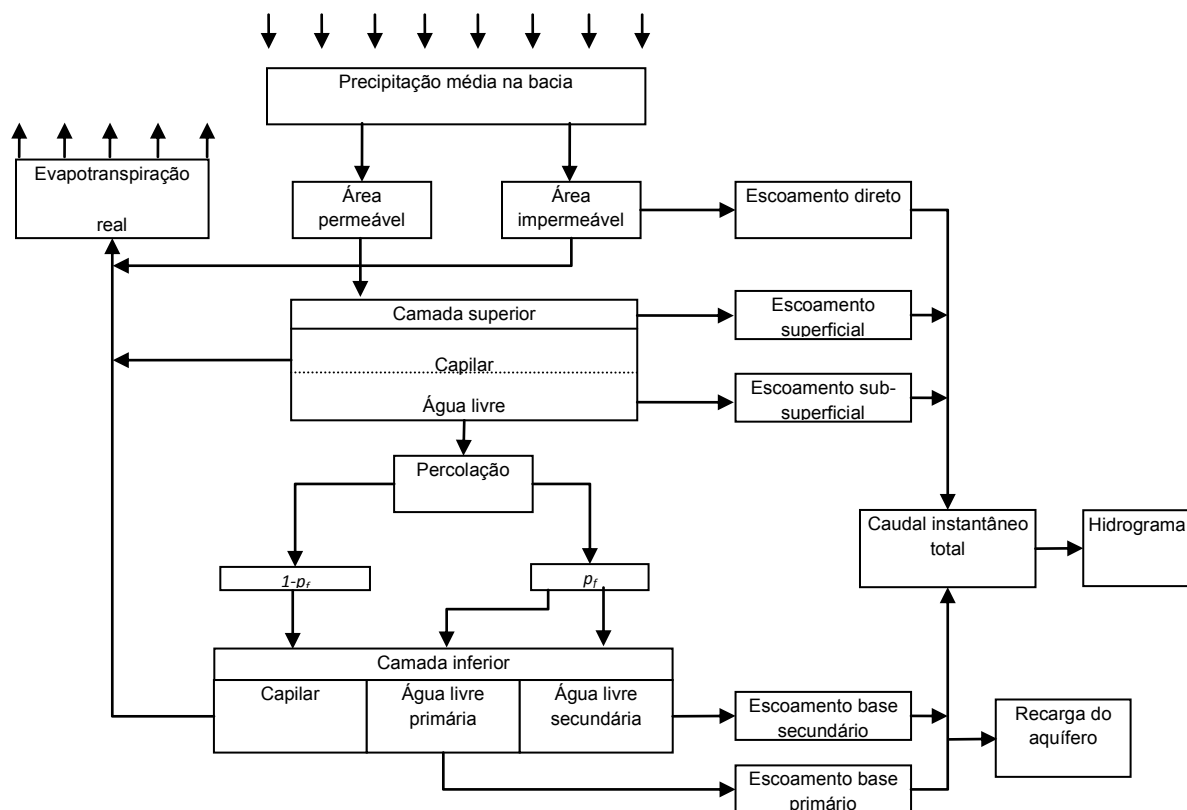


Figura 1 – Modelo hidrológico de Sacramento – esquema conceptual.

## 2.2 Hidrodinâmica

A modelação de escoamentos unidimensionais é baseada nas equações de continuidade e de conservação da quantidade de movimento. Estas equações apresentam a seguinte forma:

$$\frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A_f} \right) + g A_f \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g Q |Q|}{C^2 R A_f} - W_f \frac{\tau_{wi}}{\rho_w} = 0 \quad (2)$$

em que:  $Q$ , é o caudal [ $m^3/s$ ];  $t$ , é o tempo [ $s$ ];  $x$ , a coordenada unidimensional [ $m$ ];  $A_f$ , é a área da secção molhada [ $m^2$ ];  $g$ , é a aceleração da gravidade [ $ms^{-2}$ ];  $h$ , é a altura do escoamento [ $m$ ];  $C$ , é o coeficiente de Chézy [ $m^{1/2}s^{-1}$ ];  $R$ , é o raio hidráulico [ $m$ ];  $W_f$ , é a largura superficial [ $m$ ];  $q_{lat}$ , é o caudal lateral unitário [ $m^2s^{-1}$ ];  $\tau_{wi}$ , tensão tangencial devida ao vento [ $Nm^{-2}$ ];  $\rho_w$ , massa volúmica da água [ $kgm^{-3}$ ].

Os modelos de albufeiras podem ser criados recorrendo a trechos de canal que simulam os diferentes circuitos hidráulicos associados a cada uma das estruturas de descarga na barragem e a albufeira pode ser simulada com base na sua curva característica (área *versus*

profundidade) ou com um canal unidimensional que permita relação idêntica, construído com base na batimetria da albufeira (Vieira e Pinho, 2013).

### 2.3 Qualidade da água

Para além dos aspetos quantitativos que a operação e gestão de albufeiras implicam, são inúmeros os problemas que obrigam a um conhecimento das dinâmicas associadas aos ciclos biogeoquímicos das águas armazenadas ou de transformação de substâncias presentes nos meio hídricos. Os modelos de qualidade da água poderão dar uma resposta eficiente na análise deste tipo de problema. Esses modelos são baseados na equação de transporte que, na sua formulação unidimensional, tem a forma:

$$\frac{\partial(A_f C)}{\partial t} = -\frac{\partial(QC)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( DA_f \frac{\partial C}{\partial x} \right) + SA_f \quad (3)$$

em que:  $C$ , é a concentração de constituinte [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];  $D$ , é o coeficiente de dispersão turbulenta [ $\text{m}^2/\text{s}$ ];  $S$ , é a fonte ou sumidouro devido a transferências (entradas ou saídas) no sistema e a transformações (produção ou decaimento) por reações que ocorrem na coluna de água [ $\text{kg}/\text{m}^3/\text{s}$ ].

São consideradas tantas equações quantas as variáveis envolvidas no processo de qualidade da água a simular. Os diferentes processos biogeoquímicos com interesse para o estudo de problemas de qualidade da água apresentam uma diversidade muito grande, podendo implementar-se processos simples (como por exemplo a modelação de descargas acidentais de poluentes conservativos), ou processos de maior complexidade, como é o caso dos modelos de produção primária (Vieira et al., 2013).

### 3 PLATAFORMA TECNOLÓGICA

A ferramenta desenvolvida (Pinho et al., 2011) é suportada por uma plataforma que inclui um servidor de base de dados, um servidor *WWW*, *software* de modelação e uma tecnologia de representação gráfica adequada a ambientes *WWW*. Com a plataforma tecnológica desenvolvida disponibiliza-se uma solução em que o utilizador final não necessite de dominar todas as matérias necessárias à criação de um determinado modelo mas, por outro lado, que os resultados obtidos apresentem a necessária fiabilidade para serem considerados nas opções de gestão das infra-estruturas hidráulicas em que é utilizada.

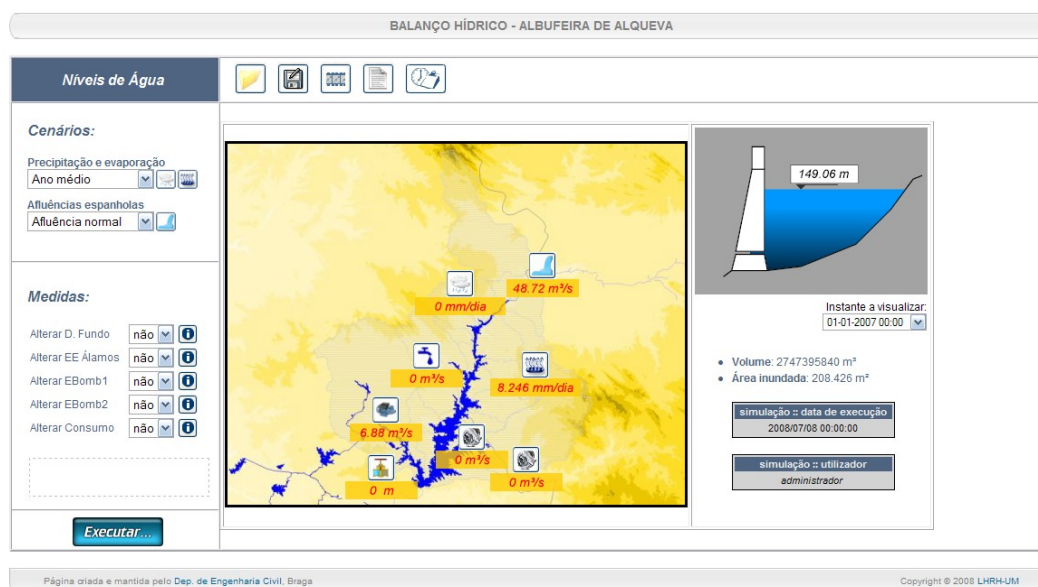
A ferramenta foi desenvolvida recorrendo-se a linguagens de programação PHP, HTML, SVG, JavaScript, MySQL, sendo constituídas por páginas dinâmicas cujo código HTML e SVG é gerado automaticamente. Esta produção automática de código é conseguida através da linguagem de programação PHP, que é responsável por gerar o conteúdo HTML a enviar para o cliente Web. A linguagem Javascript é utilizada na interação do utilizador com a interface.

O sistema desenvolvido revela-se rápido e robusto, permitindo lidar com um número ilimitado de utilizadores e de registos. Como características principais deste sistema destacam-se: a portabilidade (suporta praticamente qualquer plataforma atualmente disponível); a compatibilidade (existem *drivers* e módulos de interface para diversas

linguagens de programação); o excelente desempenho e estabilidade; a facilidade de uso; e a pouca exigência em termos de recursos de *hardware*.

#### 4 APLICAÇÃO WEB

A aplicação desenvolvida para implementação de modelos operacionais de apoio à gestão de albufeiras apresenta todas as funcionalidades disponibilizadas pela plataforma tecnológica apresentada anteriormente. Para a interação com os diferentes utilizadores foram criadas interfaces *web* (Figura 2) onde são disponibilizados vários dados, como por exemplo, níveis da albufeira registados na estação de monitorização, valores de precipitação e evaporação nas estações meteorológicas mais próximas e diversos valores de caudais (afluentes, turbinados/bombeados, aduzidos e descarregados) desde que estejam disponíveis na base de dados da plataforma.

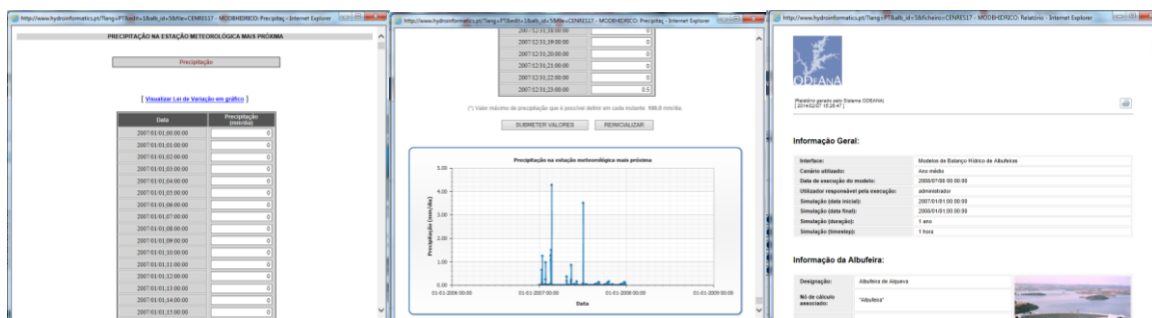


**Figura 2** - Interface da aplicação desenvolvida para modelos de albufeiras.

A aplicação apresenta várias funcionalidades que permitem a consulta dos resultados de simulações previamente realizadas e a definição de novas simulações, dependendo dos privilégios do utilizador que se encontra na plataforma. A mesma interface permite analisar os resultados ao longo do período de simulação sob a forma gráfica ou de tabela.

Além dos botões que permitem o acesso a algumas das janelas referidas anteriormente, existem ainda caixas de texto com valores associados – trata-se do valor aí verificado para o instante selecionado. Na secção lateral direita da interface é ilustrado graficamente o nível de água na albufeira, para o instante selecionado. Existe ainda informação sobre o volume e a área inundada.

A aplicação permite gerar de forma automática um relatório sobre a simulação ativa, contendo todas as séries de dados consideradas (precipitação, evaporação, caudais) e os respetivos resultados sob a forma gráfica ou em tabela (Figura 3).



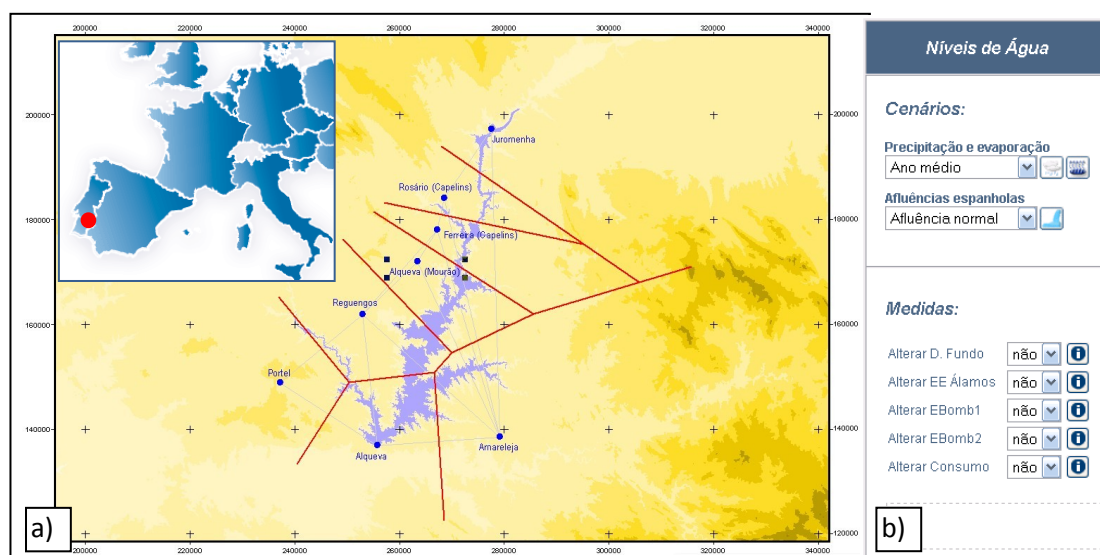
**Figura 3** – Aplicação de modelação de albufeiras: geração automática de relatórios

## 5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

A albufeira de Alqueva (Figura 4) é alimentada pelo rio Guadiana e respetivos afluentes. A sua barragem apresenta dois descarregadores de cheia, um descarregador de fundo e quatro grupos reversíveis de bombagem instalados para aproveitamento hidroelétrico. A partir desta albufeira é realizada a adução de água para o sub-sistema de irrigação de Alqueva constituído por uma rede de canais e albufeiras que assegura a distribuição de água pelas diferentes áreas de regadio. Neste exemplo de aplicação da ferramenta desenvolvida foram utilizados dados topográficos da albufeira que permitem relacionar o nível de água com o respetivo volume armazenado.

Neste caso de estudo simula-se o balanço hídrico da albufeira no ano de 2007. O exemplo foi elaborado com base na ponderação dos dados hidrológicos das estações meteorológicas existentes nas proximidades da albufeira, utilizando o método de Thiessen (Figura 4 a)), e os dados de caudais afluentes e efluentes da albufeira de Alqueva durante aquele ano.

Os dados de base são definidos a partir de um formulário da interface (Figura 4 b)).

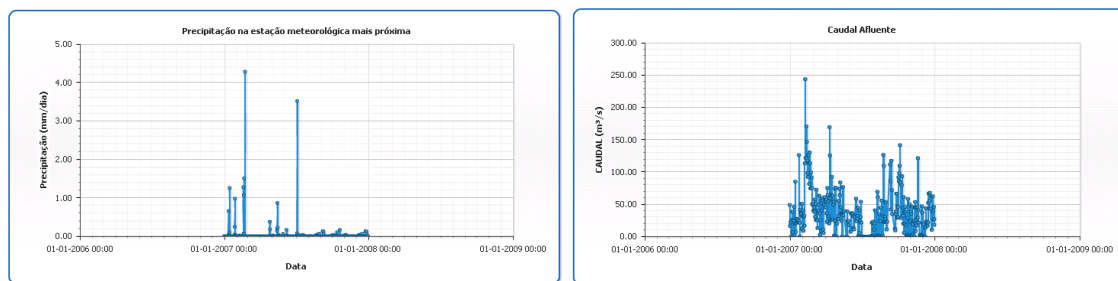


**Figura 4** – a) Localização da albufeira e polígonos de Thiessen, b) Formulário de seleção de cenários e medidas na aplicação de modelação de albufeiras.

As séries de dados de precipitação, evaporação e afluências espanholas são previamente organizadas em cenários, que podem ser utilizados para definição de novas simulações. As estruturas hidráulicas podem ser objeto de controlo, impondo-se as respetivas leis de operação para o período simulado. Caso sejam adotadas técnicas automáticas de controlo das estruturas da barragem, estas séries são ignoradas.

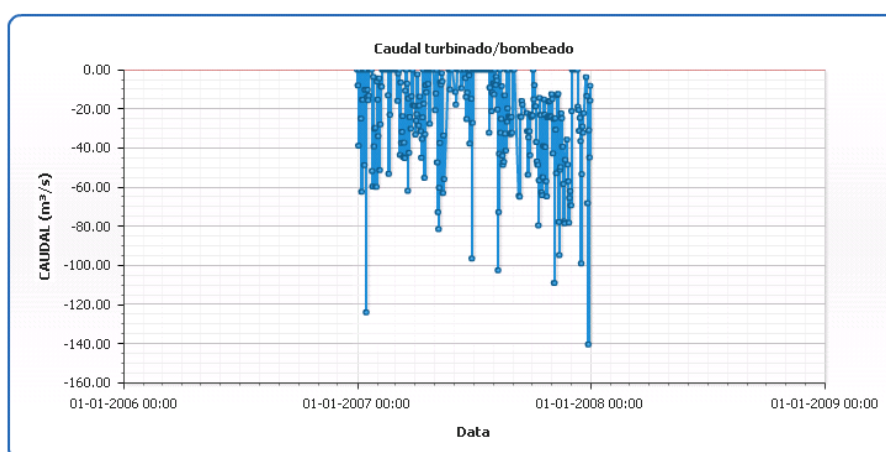
A precipitação na albufeira de Alqueva foi quantificada através de um conjunto de estações meteorológicas existentes na zona. Estas foram selecionadas utilizando os critérios de proximidade à albufeira e de disponibilidade de dados: Albufeira Alqueva, Albufeira Alqueva (Mourão), Amareleja, Ferreira Capelins, Juromenha, Reguengos, Portel e Rosário (Capelins).

Na Figura 5 apresenta-se o resultado da precipitação ponderada na bacia própria da albufeira de Alqueva para o ano de 2007 e os caudais provenientes de Espanha e registados pela estação hidrométrica de Caia (entrada do rio Guadiana em território português).



**Figura 5** – Precipitação (esquerda) e afluências do rio Guadiana (direita) na albufeira de Alqueva para o ano de 2007.

No que se refere às estruturas controláveis foram considerados os registos de caudais turbinados/bombeados na albufeira de Alqueva. A série de caudais representada na Figura 6 resulta da diferença entre os caudais bombeados e turbinados sendo, por isso, negativa se resultarem caudais turbinados e positiva se forem bombeados.

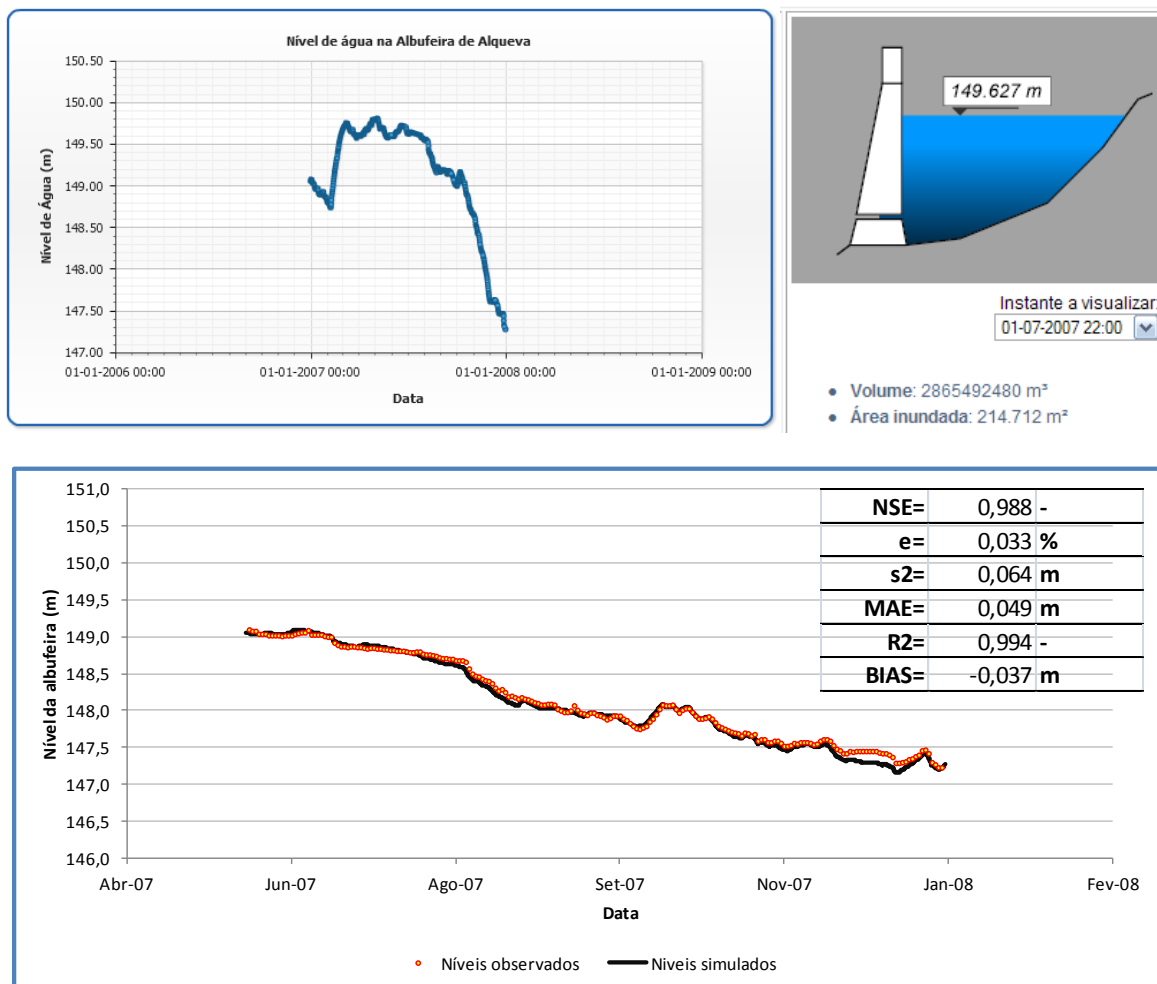


**Figura 6** – Série de caudais turbinados/bombeados na albufeira de Alqueva.

Embora o período de simulação configurado para o modelo seja de um ano, apenas se consideraram os valores horários registados a partir de 4 de Junho de 2007.



Na Figura 7 apresenta-se a série de níveis calculados através do modelo de balanço hídrico em Alqueva com base nos dados apresentados. É ainda possível, para cada instante, visualizar o nível e volume armazenado resultantes, bem como uma representação gráfica do nível na albufeira para o instante selecionado. O relatório contendo toda a informação do exemplo modelado pode ser gerado através da seleção da respetiva ferramenta na interface.



**Figura 7** – Resultados da variação do nível da albufeira de Alqueva ao longo do ano de 2007. Gráfico de nível e esquema obtidos a partir da aplicação web (superiores). Desempenho do modelo para o período de 4 de Junho de 2007 a 31 de Dezembro de 2007.

No exemplo apresentado, o balanço durante o ano de 2007 resulta negativo, ou seja, o volume de água armazenado no final do ano é inferior ao volume armazenado inicialmente. Os diferentes usos da água (abastecimento público, irrigação, produção de energia elétrica ou utilização do espelho de água) na albufeira de Alqueva obrigam a uma gestão cuidada dos seus níveis. Salienta-se ainda a boa aproximação entre valores simulados e valores observados no período em que foi realizada a comparação entre as duas séries de valores. A aproximação é caracterizada por um índice de Nash-Sutcliffe de 0,998, um coeficiente de correlação de 0,994, sendo o erro médio absoluto obtido para o nível da albufeira de 0,049 m.

A ferramenta desenvolvida permite, tal como ilustrado neste exemplo, criar diferentes cenários de modelação com o objetivo de fornecer informações importantes na tomada de decisão e, neste caso, para a gestão da água na albufeira de Alqueva, tendo em conta os seus possíveis usos.

## **6 CONCLUSÃO**

Neste trabalho procedeu-se à apresentação de uma aplicação desenvolvida em ambiente *web* vocacionada para o suporte à decisão na gestão de albufeiras. Os resultados obtidos com a sua aplicação a diversas albufeiras permite antecipar que a ferramenta desenvolvida terá muito interesse, quer para a análise de situações de gestão correntes envolvendo problemas quantitativos e qualitativos quer para a sua inclusão em sistemas de gestão operacional baseados em técnicas avançadas de gestão de albufeiras.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte, à Águas do Ave, SA, à Águas do Cávado, SA e à Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas de Alqueva o apoio financeiro concedido para o desenvolvimento de soluções informáticas inovadoras e úteis para o suporte à decisão nas atividades de planeamento e gestão dos recursos hídricos em bacias hidrográficas portuguesas.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Ackermann, T., Loucks, D., Schwanenberg, D., and Detering, M. (2000). "Real-Time Modeling for Navigation and Hydropower in the River Mosel." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 126(5), 298–303. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2000)126:5(298)

Araújo, J.M.S.; Pinho, J.L.S.; Vieira, J.M.P. (2008) Modelação do Balanço Hídrico em Albufeiras Utilizando o Programa SOBEK. 9º Congresso da Água. Cascais, Portugal. Abril 2008.

Borowski, I. and Hare, M. (2007), Exploring the gap between water managers and researchers. Difficulties of model-based tools to support practical water management. *Water Resources Management* 21 (7), 1049-1074

Fielding, M.; Schwanenberg, D.; Twigt, D.J.; Eikaas, H.S.; Pinho, J.L.S.; Vieira, J.M.P. (2010) DSS for Water Quality Management of Marina Reservoir System in Singapore. *Proceedings of 9th International Conference on Hydroinformatics*. Tianjin, China. September 2010.

Lindim, C.; Pinho, J.L.S., Vieira, J.M.P. (2010) Analysis of spatial and temporal patterns in a large reservoir using water quality and hydrodynamic modeling. *Ecological modeling*. 222. 2485-2494.

Pinho, J.L.S.; Vieira, J.M.P.; Pinho, R.; Araújo, J. (2011) Web-based decision support framework for water resources management at river basin scale, *Current Issues of Water Management*, InTech, London, 43-66, ISBN: 978-953-307-413-9.

Rijo, M. (2010) Canais de Adução. Projecto, Operação, Controlo e Modernização. Lisboa, Edições Sílabo.

Schwanenberg, D.; Talsma, J.; Pinho, J.L.S.; Reis, A.; Bessa, M.; Kuwajima, J. (2013) Short-term Reservoir Optimization for Mitigation Downstream Flood. Proceedings of 8th International Conference of EWRA "Water Resources Management in an Interdisciplinary and Changing Context", Porto, Portugal, 26 - 29 June, 2013.

van Overloop, P.-J. (2006), Model predictive control on open water systems, PhD Thesis, University of Technology, Delft, The Netherlands.

Vieira, J.M.P.; Pinho, J.L.S.; Dias, N.; Schwanenberg, D.; van den Boogaard, H.F.P. (2013) Parameter estimation for eutrophication models in reservoirs. Water Science and Technology. 68(2):319-27.

Vieira, J.M.P.; Pinho, J.L.S. (2013) Modelo hidráulico dos aproveitamentos hidroeléctricos da bacia do rio Cávado. Proceedings II Congresso Internacional de Ingeniería Civil y Territorio - Galicia - Norte de Portugal, Vigo, Espanha, 20-21 Maio, 1-3, 2013.