

# CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM MODELO HIDROLÓGICO PARA A BACIA DO RIO LIMA

Luís VIEIRA (<sup>1</sup>); José PINHO (<sup>2</sup>)

**Resumo:** O presente trabalho apresenta um modelo da bacia do Rio Lima, realçando-se os aspectos relacionados com a sua construção, calibração e validação. Este modelo será utilizado na simulação hidrológica daquela bacia integrado num trabalho de investigação com o objectivo de implementar um sistema de apoio à decisão para a gestão de cheias. Foi utilizada uma ferramenta de modelação hidrológica baseada no modelo de Sacramento (incluída no programa SOBEK), que funciona em simultâneo com um modelo hidrodinâmico. A calibração e validação do modelo hidrológico foram conseguidas utilizando dados históricos de caudais e níveis de água em Ponte da Barca e Ponte do Lima para diferentes eventos de precipitação e considerando a existência, ou não, do efeito da operação das barragens situadas a montante daquelas duas vilas. Procurou-se, desta forma, simular a hidrodinâmica do rio Lima quer em situações de escoamento normais quer durante a ocorrência de cheias, considerando os períodos anterior e posterior à construção das barragens do Alto Lindoso e de Touvedo. Os resultados obtidos demonstram elevada correlação com os parâmetros hidráulicos medidos (caudais e níveis de água).

**Palavras-chave:** calibração, modelação hidrológica, previsão de cheias, SOBEK

---

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, Campus de Gualtar, Universidade do Minho, Portugal, email: luis.vasquez.vieira@gmail.com

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Civil. Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil, Campus de Gualtar, Universidade do Minho, Portugal email: jpinho@civil.uminho.pt

## 1 INTRODUÇÃO

Os fenómenos de cheia e inundações associadas originam muitos impactos indesejáveis. Estes eventos podem danificar propriedades, colocar em risco vidas humanas e são frequentemente associadas a grandes perdas económicas. O intenso escoamento de água provoca erosão dos solos alterando muitas vezes a morfologia dos fundos e margens. As áreas de desova para peixes e outros habitats da vida selvagem podem-se tornar poluídas ou completamente destruídas. Os danos estruturais podem ocorrer nos pilares de pontes, nas redes de drenagem de águas e outras estruturas nas zonas inundadas. A navegação em canais assim como o funcionamento das centrais hidroeléctricas são muitas vezes comprometidos.

Frequentemente é verificado que os eventos de chuvas intensas não são a única causa dos fenómenos de inundação. Na realidade, o aumento da urbanização, o negligente planeamento urbano em relação à construção de edifícios em planícies inundáveis e a falta ou inadequação das instalações de drenagem de águas pluviais são também responsáveis por esses eventos (Adeloye e Rustum , 2011).

Considerando a importância social e económica deste problema, as estratégias de gestão de cheias para o planeamento urbano e regional são absolutamente necessárias. A Directiva 2007/60/EC (EU, 2007) sobre cheias, estabelece a obrigatoriedade de elaboração de cartas de zonas inundáveis que devem conter informação sobre características hidrológicas e hidrodinâmicas de regiões vulneráveis (áreas inundadas, níveis de água e caudais) com o objectivo de reduzir as consequências adversas para a saúde pública, ambiente, património cultural e actividades económicas associadas a cheias, na União Europeia.

Abordagens metodológicas para lidar com problemas de cheias recomendam a incorporação de ferramentas de suporte à decisão no processo de procura das melhores opções de planeamento e acções de remediação a serem tomadas numa escala da bacia hidrográfica (Sprague e Carlson, 1982; Vieira *et al.*, 2012).

A previsão e gestão de cheias implicam a recolha e análise estatística de dados relevantes e a implementação de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos. A hidroinformática é um ramo científico que liga ferramentas informáticas com modelos de sistemas hidráulicos e conceitos ambientais (De Roo *et al.*, 2003; Penning-Roswell *et al.* 2000; Pinho *et al.*, 2004; Renner *et al.*, 2009; Werner *et al.* 2004; Verwey, 2005). A aplicação de ferramentas de modelação trouxe melhorias radicais na compreensão dos sistemas hidráulicos de larga escala, tais como rios, lagos, estuários e águas costeiras (Pinho, 2001;. Duarte *et al.*, 2001; Pinho *et al.*, 2004; Pinho e Vieira, 2005).

As mudanças no uso do solo e o aumento da consciência dos efeitos dos fenómenos de cheias provocadas por estes eventos históricos ao longo do rio Lima (Figura 1) aconselham uma melhor compreensão do comportamento hidrodinâmico do rio e o estabelecimento de medidas adequadas a serem tomadas para alcançar a segurança contra novas inundações.

Em Vieira (2013) foi criado, calibrado e validado um modelo hidrológico para a bacia do rio Lima baseado na teoria de Sacramento, com recurso ao *software* de modelação SOBEK (WL, 2005), funcionando em simultâneo com um modelo hidrodinâmico. Para a construção do modelo hidrológico procedeu-se ao processamento geográfico do terreno, utilizando a ferramenta ArcGIS. Desta forma, foi possível fazer uma adequada distribuição espacial considerando a influência relativa de cada estação meteorológica situada na bacia

hidrográfica, utilizando o método de Thiessen. Recorreu-se às séries de dados meteorológicos e hidrométricos disponíveis, cobrindo os períodos anterior e posterior ao da construção das barragens de Alto Lindoso e Touvedo, tendo sido criadas duas versões do modelo hidrológico e hidrodinâmico, para simulação daquelas duas realidades.



Figura 1. Cheias ocorridas em Ponte de Lima em 1987 (esquerda) e 2012 (direita).

## 2 METODOLOGIA

A construção do modelo hidrodinâmico e hidrológico foi baseado em diferentes técnicas com o suporte da ferramenta ArcGIS e utilizando fotografias aéreas, dados batimétricos e topográficos, informação de caudais e níveis de água (Ferreira, 2010). O modelo hidrodinâmico do rio Lima estende-se desde a foz do rio Lima, em Viana do Castelo (funcionado como condição de fronteira a jusante), até à barragem do Alto Lindoso (condição de fronteira a montante). A rede hidrográfica compreende também os seus afluentes. O modelo hidrológico tem como base a teoria de Sacramento que pressupõe o conhecimento de valores para 16 parâmetros distintos. Estes modelos foram criados e implementados utilizando o *software* SOBEK. Pormenores destes modelos são apresentados seguidamente.

### 2.1 SOBEK

SOBEK é um pacote de *software* (Deltares, 2013) aplicável à modelação hidrodinâmica de rios, estuários ou redes de drenagem. O seu desenvolvimento integrado permite a simulação de problemas envolvendo diferentes módulos em simultâneo. É baseado num método numérico robusto que permite a obtenção de soluções mesmo para simulações complexas. Este *software* de modelação é baseado nas equações de Saint Venant utilizando o método de diferenças finitas para sua integração:

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

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

em que:

$Q$  = caudal ( $m^3/s$ )

$t$  = tempo (s)

$x$  = coordenada unidimensional (m)

$A_f$  = é a área da secção molhada ( $m^2$ )  
 $g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )  
 $h$  = altura do escoamento (m)  
 $C$  = coeficiente de Chézy ( $m^{1/2}/s$ )  
 $R$  = raio hidráulico (m)  
 $W_{f,s}$  = largura superficial (m)  
 $q_{lat}$  = caudal lateral unitário ( $m^2/s$ )  
 $T_{wi}$  = tensão tangencial devida ao vento ( $N/m^2$ )  
 $\rho_w$  = massa volúmica da água ( $kg/m^3$ )

## 2.2 Modelo hidrológico de Sacramento: parâmetros, variáveis e esquematização

O modelo de Sacramento conceptualiza a bacia hidrográfica como uma coluna de solo dividida verticalmente em duas zonas de armazenamento, que são preenchidas e esvaziadas para simular infiltração, percolação, escoamento de base e intermédio, através da bacia hidrográfica (Figura 2). As zonas superiores e inferiores representam a capacidade de infiltração da camada superficial do solo e do aquífero subjacente, respectivamente. O escoamento é calculado como o excesso de volume líquido remanescente da precipitação após sua interceptção e infiltração. A taxa de infiltração e capacidade de retenção de água das zonas são representadas com os parâmetros conceptuais que, embora não apresentem um significado físico concreto, podem relacionar-se com variáveis físicas dos solos, tais como a porosidade e as taxas de percolação (Burnash & Ferral, 2002).

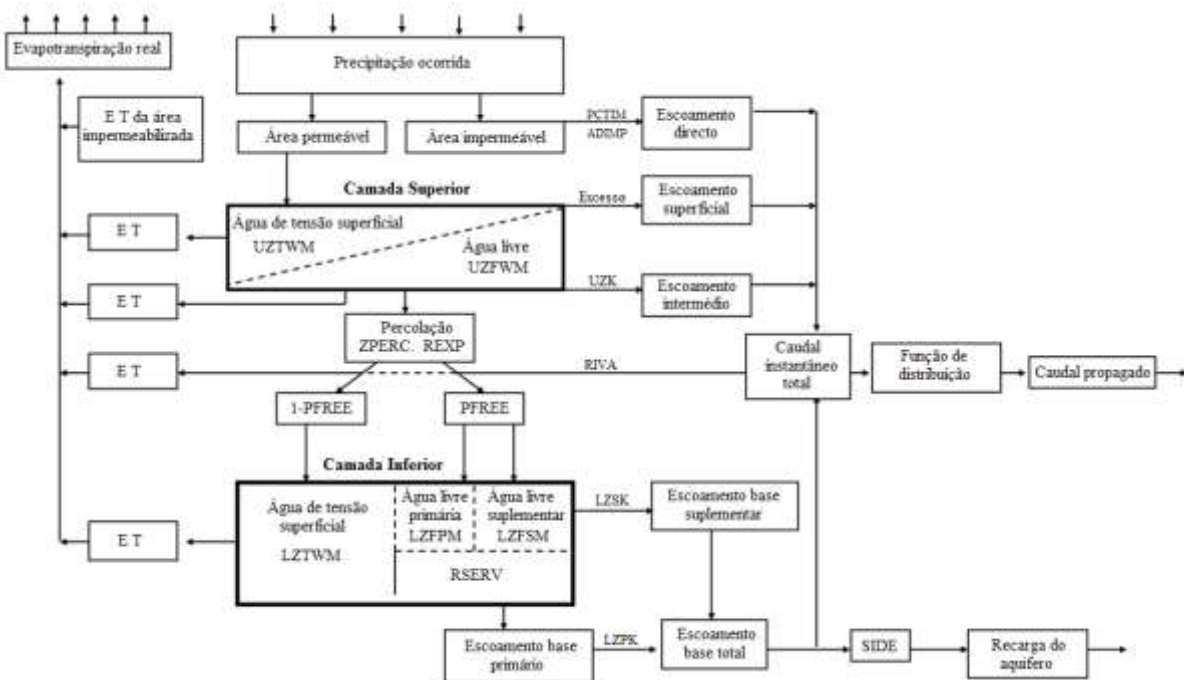


Figura 2. Esquematização do modelo hidrológico de Sacramento (adaptado de Riverside, 2013).

Embora não sendo propriamente físicos, os parâmetros do modelo de Sacramento podem ser estimados *a priori* utilizando o pressuposto de que a humidade do solo extraível está relacionada com a tensão superficial e que os armazenamentos nas camadas consideradas se referem a água livre (Koren *et al.*, 2000). Utilizando a variação dos limites das

propriedades de solos e com base na experiência de calibração, Anderson *et al.* (2006) desenvolveram um conjunto de seis variáveis de estado (Tabela 1) e um intervalo de valores aceitáveis para onze dos parâmetros de Sacramento, como se mostra na Tabela 2.

**Tabela 1.** Variáveis de estado do modelo de Sacramento (Anderson *et al.*, 2006).

Variáveis de Estado	Descrição
ADIMC	Capacidade de água sob tensão da área ADIMP (mm)
UZTWC	Capacidade de água sob tensão da zona superior (mm)
UZFWC	Capacidade de água livre da zona superior (mm)
LZTWC	Capacidade de água sob tensão da zona inferior (mm)
LZFSC	Capacidade livre suplementar da zona inferior (mm)
LZFPC	Capacidade livre primária da zona inferior (mm)

**Tabela 2.** Parâmetros do modelo de Sacramento e seus intervalos de variação (Anderson *et al.*, 2006).

No.	Parâmetro	Descrição	Intervalo
1	UZTWM	Capacidade máxima de armazenamento superior de água de tensão superficial (mm)	10–300
2	UZFWM	Capacidade máxima do armazenamento superior de água livre (mm)	5–150
3	UZK	Coefficiente de depleção lateral na zona superior de água livre ( $\text{dia}^{-1}$ )	0.10–0.75
4	ZPERC	Taxa de percolação mínima e máxima	5–350
5	REXP	Parâmetro de forma da curva de percolação	1–5
6	LZTWM	Capacidade máxima do armazenamento inferior de água de tensão superficial (mm)	10–500
7	LZFSM	Capacidade máxima do armazenamento inferior suplementar de água livre (mm)	5–400
8	LZFPM	Capacidade máxima do armazenamento inferior primário de água livre (mm)	10–1000
9	LZSK	Coefficiente de depleção lateral da zona inferior suplementar de água livre ( $\text{dia}^{-1}$ )	0.01–0.35
10	LZPK	Coefficiente de depleção lateral da zona inferior primária de água livre ( $\text{dia}^{-1}$ )	0.001–0.05
11	PFREE	Fracção da água percolada da zona superior que vai directa para a zona de água livre inferior	0.0–0.8
12	PCTIM	Fracção de área constantemente impermeável na bacia	
13	ADIMP	Fracção máxima de uma área impermeável adicional devido a saturação	
14	RIVA	Fracção de área coberta por mata ciliar na bacia	
15	SIDE	Taxa de percolação das camadas inferiores de água livre	
16	RSERV	Fracção da água livre da zona inferior que não é transferível para a zona de água de tensão superficial	

Este modelo pode ser escrito como um sistema com duas entradas, duas saídas e seis estados não-negativos. A formulação espacial de estado do modelo Sacramento foi desenvolvida em Kitanidis e Bras (1980), sendo refinado posteriormente em Bae e Georgakakos (1992).

As variáveis de estado são definidas por:

$x_1$  (UZTWM) = água sob tensão na camada superior (mm)

$x_2$  (UZFWM) = água livre na camada superior (mm)

$x_3$  (LZTWM) = água sob tensão na camada inferior (mm)

- $x_4$  (LZFPM) = água livre primária na camada inferior (mm)
- $x_5$  (LZFSM) = água livre secundária na camada inferior (mm)
- $x_6$  = armazenamento adicional impermeabilizado (mm)

Os dados de entrada do sistema são dados da seguinte forma:

- $u_p$  = precipitação média na bacia (mm/h)
- $u_e$  = evapotranspiração potencial (mm/h)

Os dados de saída do sistema são:

- $u_c$  = caudal instantâneo total (mm/h)
- $u_{er}$  = evapotranspiração real (mm/h)

A equação de estado de água sob tensão superficial da camada superior é dada por:

$$\frac{dx_1}{dt} = \left[ 1 - \left( \frac{x_1}{x_1^0} \right)^{m_1} \right] \times u_p - e_u \times \left( \frac{x_1}{x_1^0} \right) \quad (3)$$

A equação de estado de água livre na camada superior é dada por:

$$\frac{dx_2}{dt} = \left( \frac{x_1}{x_1^0} \right)^{m_1} \times u_p \times \left[ 1 - \left( \frac{x_2}{x_2^0} \right)^{m_2} \right] - d_u x_2 - C_1 \times \left( 1 + \varepsilon \times y^{\theta_c} \right) \times \left( \frac{x_2}{x_2^0} \right) \quad (4)$$

A equação de estado de água sob tensão superficial na camada inferior é dada por:

$$\frac{dx_3}{dt} = C_1 \times \left( 1 + \varepsilon \times y^{\theta_c} \right) \times \left( \frac{x_2}{x_2^0} \right) \times \left( 1 - p_f \right) \times \left[ 1 - \left( \frac{x_3}{x_3^0} \right)^{m_3} \right] - e_u \times \left( 1 - \left( \frac{x_1}{x_1^0} \right) \right) \times \left( \frac{x_3}{x_1^0 + x_3^0} \right) \quad (5)$$

A equação de estado de água livre primária na camada inferior é dada por:

$$\frac{dx_4}{dt} = C_1 \times \left( 1 + \varepsilon \times y^{\theta_c} \right) \times \left( \frac{x_2}{x_2^0} \right) \times \left[ 1 - \left( 1 - p_f \right) \times \left[ 1 - \left( \frac{x_3}{x_3^0} \right)^{m_3} \right] \right] \times \left[ \left( C_2 \times \left( \frac{x_5}{x_5^0} \right) - 1 \right) \times \left( \frac{x_4}{x_4^0} \right) + 1 \right] - d_1' x_4 \quad (6)$$

A equação de estado de água livre secundária na camada inferior é dada por:

$$\frac{dx_5}{dt} = C_1 \times \left( 1 + \varepsilon \times y^{\theta_c} \right) \times \left( \frac{x_2}{x_2^0} \right) \times \left[ 1 - \left( 1 - p_f \right) \times \left[ 1 - \left( \frac{x_3}{x_3^0} \right)^{m_3} \right] \right] \times \left( 1 - C_2 \times \left( \frac{x_5}{x_5^0} \right) \right) \times \left( \frac{x_4}{x_4^0} \right) - d_1'' x_5 \quad (7)$$

A equação de estado da água na área impermeabilizada é dada por:

$$\frac{dx_6}{dt} = \left[ 1 - \left( \frac{x_6}{x_3^0} \right)^2 \right] \times \left[ 1 - \left( \frac{x_2}{x_2^0} \right)^{m_2} \right] \times \left( \frac{x_1}{x_1^0} \right)^{m_1} \times u_p - e_u \times \left( 1 - \left( \frac{x_1}{x_1^0} \right) \right) \times \left( \frac{x_6}{(x_3^0 + x_1^0)} \right) \quad (8)$$

A variável de saída  $u_c$  do modelo de Sacramento, é dada por:

$$\begin{aligned}
u_c = & \left( d_u x_2 + \frac{d'_1 x_4 + d''_1 x_5}{1 + \mu} \right) \times (1 - \beta_1 - \beta_2) + u_p \beta_2 + \left( \frac{x_6 - x_1}{x_3^0} \right) \times u_p \times \left( \frac{x_1}{x_1^0} \right)^{m_1} \times \beta_1 + \\
& + u_p \times \left( \frac{x_1}{x_1^0} \right)^{m_1} \times \left( \frac{x_2}{x_2^0} \right)^{m_2} (1 - \beta_1 - \beta_2) + \left[ 1 - \left( \frac{x_6}{x_3^0} \right)^2 \right] \times \left( \frac{x_2}{x_2^0} \right)^{m_2} \left( \frac{x_1}{x_1^0} \right)^{m_1} \times u_p \times \beta_1
\end{aligned} \tag{9}$$

A variável de saída da evapotranspiração real é dada por:

$$u_{er} = e_u \times \left( \frac{x_1}{x_1^0} \right) + e_u \times \left( 1 - \left( \frac{x_1}{x_1^0} \right) \right) \times \left( \frac{x_3}{x_1^0 + x_3^0} \right) + e_u \times \left( 1 - \left( \frac{x_1}{x_1^0} \right) \right) \times \left( \frac{x_6}{x_3^0 + x_1^0} \right) \tag{10}$$

onde,

- $x_1^0$  = Capacidade de armazenamento da subzona de capilaridade na camada superior (mm)
- $x_2^0$  = Capacidade de armazenamento da subzona de água livre na camada superior (mm)
- $x_3^0$  = Capacidade de armazenamento da subzona de capilaridade na camada inferior (mm)
- $x_4^0$  = Capacidade de armazenamento da subzona de água livre primária na camada inferior (mm)
- $x_5^0$  = Capacidade de armazenamento da subzona de água livre secundária na camada inferior (mm)
- $d_u$  = Taxa de drenagem instantânea da camada superior ( $h^{-1}$ )
- $d'_1$  = Taxa de drenagem instantânea primária da camada inferior ( $h^{-1}$ )
- $d''_1$  = Taxa de drenagem instantânea secundária da camada inferior ( $h^{-1}$ )
- $\varepsilon$  = Coeficiente da função de percolação
- $\theta_c$  = Expoente da função de percolação
- $\mu$  = Fracção de fluxo base que não aparece no rio, constituindo recarga do aquífero.
- $\beta_1$  = Fracção da bacia que se torna impermeável quando a capacidade de capilaridade for atingida
- $\beta_2$  = Fracção da bacia permanentemente impermeabilizada
- $m_1$  = Expoente da função da subzona de capilaridade da camada superior
- $m_2$  = Expoente da função da subzona de água livre da camada superior
- $m_3$  = Expoente da função da subzona de capilaridade da camada inferior

São ainda definidas as seguintes variáveis auxiliares ( $y$ ,  $C_1$  e  $C_2$ ):

$$y = 1 - \frac{x_3 + x_4 + x_5}{x_3^0 + x_4^0 + x_5^0} \tag{11}$$

$$C_1 = d'_1 x_4^0 + d''_1 x_5^0 \tag{12}$$

$$C_2 = \frac{d'_1 x_4^0}{C_1} \tag{13}$$

onde,

- $y$  = deficit de água da camada inferior
- $C_1$  = taxa limite inferior da percolação
- $C_2$  = percentagem de percolação destinada ao reservatório de água livre da camada inferior.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Lima (Figura 3), localizada na região norte de Portugal, tem uma área total de drenagem de aproximadamente 2450 km<sup>2</sup>. Cerca de 46,5 % dessa área está situada em território Português e a restante em Espanha. Esta bacia tem uma altitude média de 447 m, com vários picos acima de 1300 m, uma precipitação média anual na faixa de 1300-4200 mm e uma densidade populacional média de 112 habitantes/km<sup>2</sup> (Vieira e Pinho, 2010). A maior contribuição para a formação de grandes cheias vem do escoamento gerado na sua secção intermédia. Este facto deve-se não apenas aos eventos de chuvas intensas verificadas na região, mas também à capacidade desta área para gerar escoamento superficial com uma propagação do caudal a alta velocidade devido à baixa permeabilidade do solo e à presença de vales escarpados e profundos.

Duas barragens (Alto Lindoso e Touvedo) estão em operação desde 1992 e as suas albufeiras apresentam uma capacidade significativa de armazenamento contribuindo para o controlo de caudais de cheias.



Figura 3. Localização da área de estudo.

### 4 CALIBRAÇÃO DO MODELO

Atendendo ao facto de se dispor de apenas duas estações hidrométricas actualmente activas, o processo de calibração foi faseado e realizado para duas situações temporais distintas. Na primeira, abrangendo o período entre 1932 e 1960, realizaram-se duas calibrações: uma considerando apenas a bacia hidrográfica do rio Vez; outra abrangendo a totalidade da bacia do rio Lima com todos os seus afluentes. Na segunda fase de calibração, compreendendo o período entre 2002 e 2012, a calibração foi efectuada considerando a contribuição das sub-bacias a montante da barragem de Touvedo e a jusante de Alto Lindoso. Foram ainda consideradas as leis de operação das estruturas das barragens e os níveis de água nas albufeiras.



As duas fases de calibração seguiram uma metodologia semelhante: em primeiro lugar, é efectuada uma análise de hidrogramas para a obtenção de 8 dos 16 parâmetros necessários, seguindo-se uma análise de sensibilidade para a obtenção dos restantes 8. A estimação destes 8 parâmetros indeterminados é uma tarefa laboriosa, uma vez que é realizada de forma manual. Uma vez que a execução de inúmeras simulações com o *software* SOBEK se mostrou inviável, devido ao tempo consumido em cada simulação, foi programado o modelo de Sacramento em “Visual Basic for Applications” (VBA) com o qual foi possível obter uma resposta muito mais rápida do que aquela que seria obtida apenas com a aplicação do SOBEK, agilizando-se deste modo o processo de calibração manual.

#### **4.1 Primeira fase de calibração**

Através da análise de hidrogramas de cheia e de dados de precipitação é possível utilizar um procedimento para uma estimação inicial de alguns parâmetros do modelo de Sacramento. Este procedimento é usualmente aplicado e funciona bem, desde que os conceitos do modelo sejam aplicáveis e que os registos dos dados sejam fiáveis considerando uma amostra temporal significativa. A sequência da estimação dos parâmetros segue uma directriz aconselhada pelo manual do programa SOBEK.

Os parâmetros LZPK, LZFPM, LZSK e LZFSM foram estimados a partir da zona de recessão do hidrograma (Deltares, 2013).

Seguindo a sequência recomendada, foi realizada a estimação da fracção de área impermeável na bacia. O parâmetro PCTIM pode ser determinado a partir da análise de hidrogramas de pequenas tempestades após um período significativo de tempo seco. Em seguida, o volume de escoamento directo (escoamento observado - escoamento de base), dividido pelo volume da chuva dá-nos uma estimativa da percentagem de fracção impermeável da bacia.

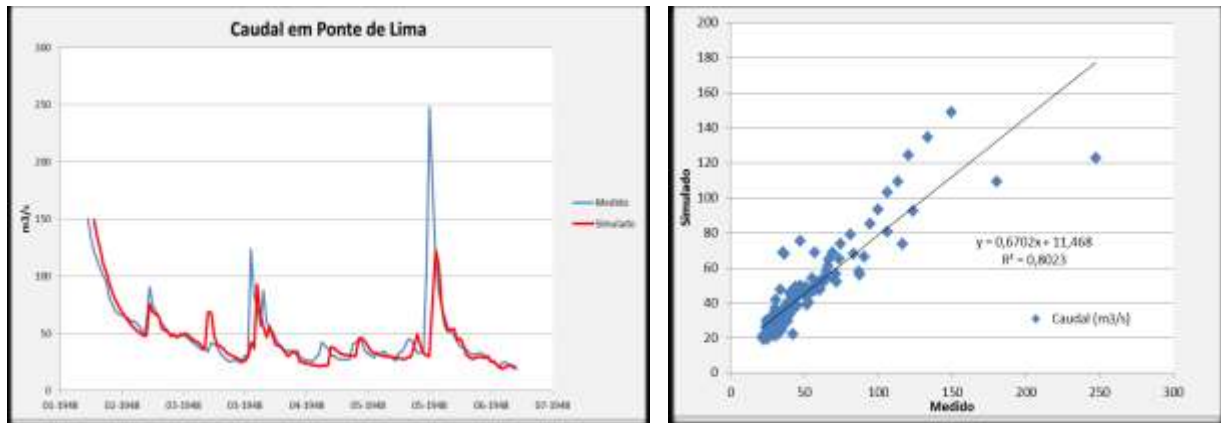
A sequência final recomendada para a estimação dos parâmetros de Sacramento consiste numa metodologia para estimar os parâmetros associados à camada superior do solo UZTWM, UZFWM e UZK.

Após esta estimativa inicial dos parâmetros, o passo seguinte foi inserir esses valores no modelo SOBEK criado para a bacia do rio Lima. Uma vez que apenas 8 dos 16 parâmetros foram estimados, foi feita uma análise de sensibilidade para determinar os parâmetros restantes dentro do intervalo recomendado no conjunto de dados SSURGO. Para cada um dos parâmetros não estimados com um intervalo possível definido (ZPERC, REXP, LZTWM e PFREE), foram feitas duas simulações: uma utilizando o valor mais baixo e outra com o valor mais elevado existente nos intervalos recomendados da SSURGO. Estas simulações foram feitas com valores fixos para os 8 parâmetros estimados. Quanto aos outros parâmetros não-estimados (ADIMP, RIVA, SIDE e RSERV) foi aplicado o valor por defeito disponível no *software* SOBEK.

Revelando-se uma tarefa muito demorada e constatando-se que seria inviável correr inúmeras simulações do modelo SOBEK, devido ao tempo decorrido em cada simulação, foi decidido desenvolver uma aplicação autónoma do modelo de Sacramento programado em VBA.

Através da aplicação dos modelos de VBA e SOBEK foi possível obter uma combinação final dos 16 parâmetros de calibração Sacramento quer inicialmente para a sub-bacia do rio

Veiz quer depois (utilizando a sub-bacia contributiva já calibrada do rio Veiz) para a globalidade da bacia do rio Lima. A Figura 4 demonstra o resultado da calibração desta primeira fase de calibração (sem a existência das barragens).



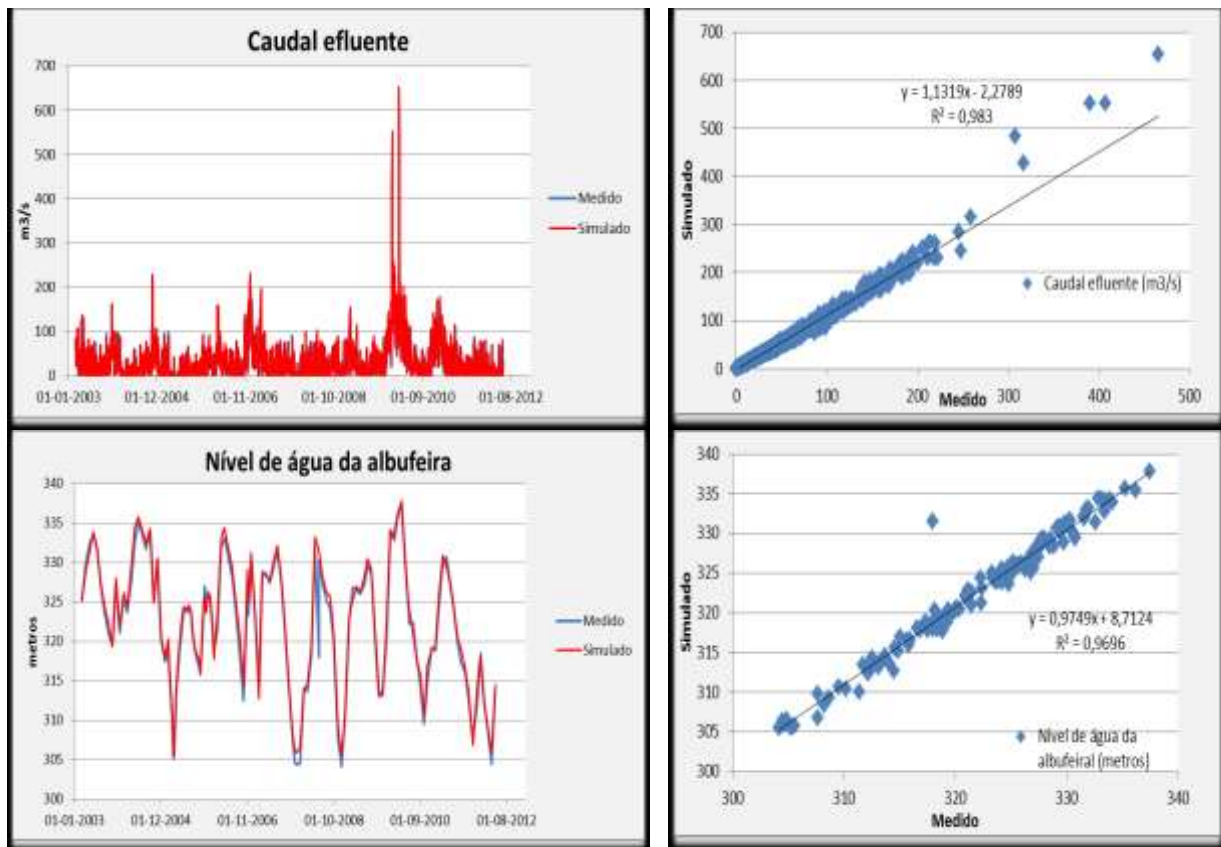
**Figura 4.** Resultados da calibração das sub-bacias do rio Lima: caudal observado e simulado em Ponte de Lima (esquerda); correlação entre valores simulados e valores observados (direita).

#### 4.2 Segunda fase de calibração

A segunda fase de calibração utilizou dados registados no período de 2002 a 2012, utilizando-se, assim, uma versão do modelo do rio Lima com a existência das barragens do Alto Lindoso e Touvedo. Esta fase de calibração teve como principal objectivo a calibração das sub-bacias existentes entre as duas barragens assim como as leis dos processos operacionais das mesmas (cota de albufeiras, caudais turbinados e caudais efluentes).

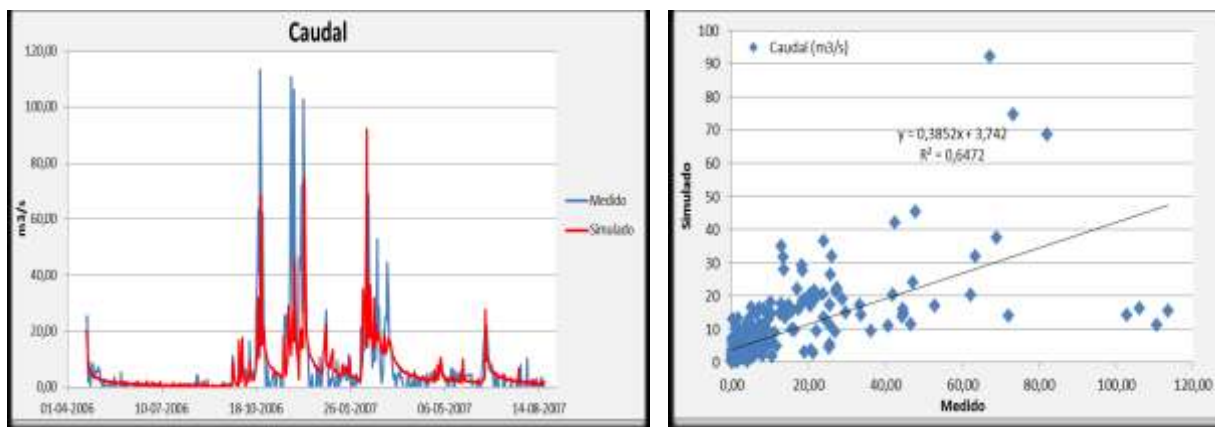
Considerando como bem-sucedida a metodologia de calibração adoptada na primeira fase de calibração, o procedimento adoptado para esta segunda fase foi exactamente o mesmo, sendo que, inicialmente, foi necessário proceder à calibração dos processos operacionais das duas barragens. Para a calibração destas estruturas hidráulicas foram utilizados todos os dados históricos existentes tendo esta calibração sido realizada de forma independente. Em primeiro lugar foi calibrada a barragem do Alto Lindoso, sendo de seguida calibrada a barragem do Touvedo.

O primeiro processo operacional a ser calibrado foi o caudal turbinado. No caso particular da barragem do Alto Lindoso foi necessário considerar um período de simulação com um caudal constante por forma a encher a albufeira com um nível de água idêntico ao definido nas condições iniciais, uma vez que não foi considerada qualquer condição de fronteira artificial para simular a albufeira. Uma vez definidas as leis de abertura dos orifícios para simular os caudais turbinados, procedeu-se à calibração das leis de abertura das comportas das barragens. O nível de água nas albufeiras foi o ultimo processo operacional a ser calibrado. Na Figura 5 é possível verificar os resultados da calibração relacionada com o nível de água da albufeira assim como os caudais turbinados da barragem do Alto Lindoso.



**Figura 5.** Resultados da calibração dos processos operacionais da barragem do Alto Lindoso: caudal efluente e nível de água (esquerda); correlação entre valores simulados e valores observados (direita).

Uma vez calibrados todos os processos operacionais de ambas as barragens, prosseguiu-se com a estratégia de calibração previamente definida, sendo o passo seguinte a calibração das sub-bacias existentes entre as barragens. Este passo foi alvo de uma abordagem diferente, tendo em consideração que o caudal efluente da barragem do Alto Lindoso subtraído dos caudais afluentes à barragem do Touvedo constitui a contribuição da precipitação destas sub-bacias. A calibração das sub-bacias existentes entre as barragens seguiu exactamente a mesma metodologia já adoptada para a primeira fase de calibração. Foi feita uma primeira análise aos hidrogramas e depois uma análise de sensibilidade utilizando o modelo SOBEK da bacia do rio Lima em conjunto com o modelo de Sacramento programado em VBA (independentes entre si). O cenário de calibração compreendeu o período entre 2006 e 2007. Na Figura 6 apresentam-se os resultados da calibração das sub-bacias existentes entre as barragens do Alto Lindoso e Touvedo.



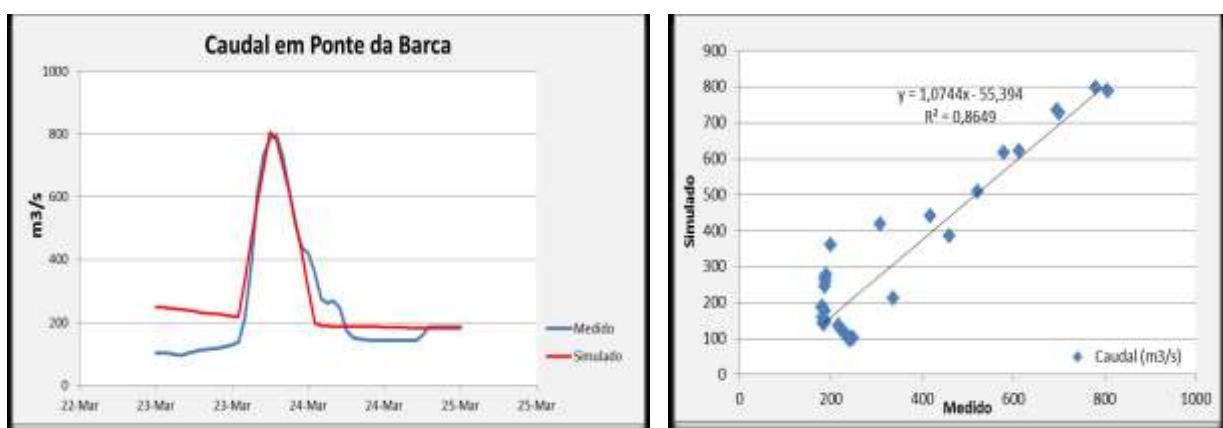
**Figura 6.** Resultados da calibração das sub-bacias do rio Lima entre as barragens do Alto Lindoso e Touvedo: caudal observado e simulado em Ponte de Lima (esquerda); correlação entre valores simulados e valores observados (direita).

Realça-se o facto do procedimento para o complexo processo de calibração do modelo hidrológico de Sacramento se ter revelado uma tarefa difícil e demorada para se obter uma boa estimativa de parâmetros para cada uma das sub-bacias.

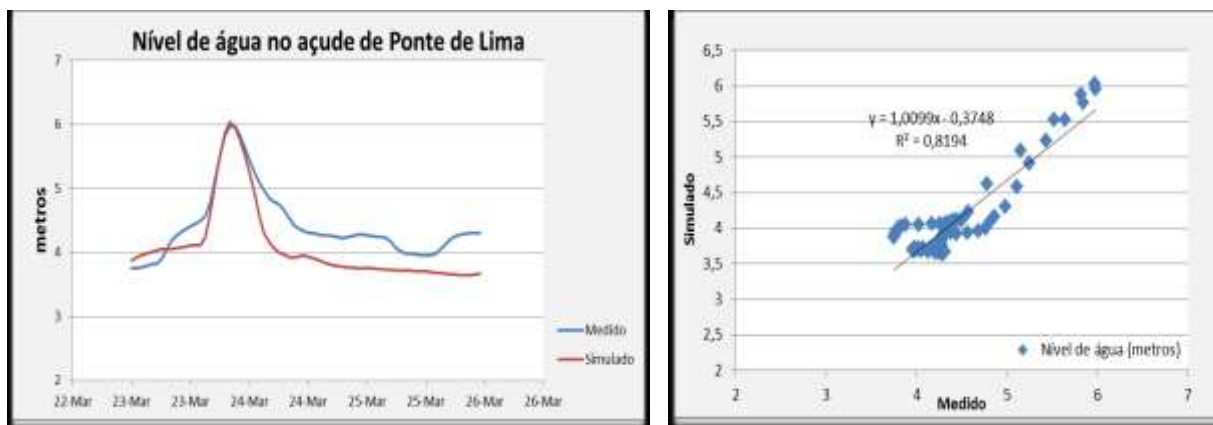
### 5 VALIDAÇÃO DO MODELO

A validação do modelo é um processo de avaliação do desempenho do modelo calibrado utilizando um diferente período temporal de análise. Para esta validação, foi utilizado um evento correspondente a um fenómeno de cheia que ocorreu em 23 e 24 de Março de 2006, considerando-se um período de simulação de sete dias compreendido entre as 00:00h de 20-03-2006 e as 23:45h de 26-03-2006. O intervalo de tempo de simulação utilizado foi de 15 minutos. Os resultados da simulação em cenário de validação são focados em dois locais diferentes. Em primeiro lugar, foi estudado o comportamento dos caudais do rio Lima na estação hidrométrica de Ponte da Barca, e depois os níveis de água medidos no açude de Ponte de Lima.

Para avaliar a qualidade do ajuste entre os caudais e os níveis de água observados e os resultados da simulação, foi utilizado o coeficiente de correlação  $R^2$  para comparar os valores medidos e simulados. As Figuras 7 e 8 mostram estes valores medidos e simulados.



**Figura 7.** Resultados da validação do modelo: caudal simulado e observado em Ponte da Barca (esquerda); correlação entre valores simulados e valores observados (direita).



**Figura 8.** Resultados da validação do modelo: nível de água simulado e observado em Ponte de Lima (esquerda); correlação entre valores simulados e valores observados (direita).

Como se pode observar, os resultados obtidos foram muito encorajadores, visto que o evento simulado é muito similar ao registado. Um aspecto importante a referir é o facto do pico de cheia ter sido perfeitamente simulado, dando confiança nos resultados obtidos para períodos de cheia.

## 6 CONCLUSÕES

Os processos de calibração e validação constituem aspectos de primordial importância para garantir confiança nos resultados obtidos quando se utilizam modelos matemáticos na simulação de fenómenos hidrológicos e hidrodinâmicos.

A aleatoriedade e variabilidade intrínseca aos dados hidrológicos e hidrodinâmicos registados numa bacia hidrográfica conferem àqueles processos um elevado grau de dificuldade e complexidade que obrigam à adopção de metodologias adequadas à caracterização de todos os fenómenos determinantes da hidrologia e da hidrodinâmica de uma bacia hidrográfica.

No presente trabalho foi adoptada uma metodologia faseada para a calibração e validação do modelo SOBEK (hidrológico e hidrodinâmico). Dos resultados obtidos constata-se um bom desempenho no estabelecimento dos parâmetros de Sacramento para todas as sub-bacias do rio Lima, assim como na definição de leis de abertura dos órgãos das barragens consideradas no caso de estudo.

Apesar de, neste trabalho, terem sido estudados os resultados para as estações de monitorização em Ponte da Barca e Ponte de Lima, é possível obter resultados com o mesmo rigor para outros pontos da bacia hidrográfica do rio Lima. Por outro lado, dada a sua generalidade, a metodologia adoptada na calibração e validação dos modelos demonstrou ser aplicável em outras bacias hidrográficas com características semelhantes às do rio Lima.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adeloye, A. and Rustum R. (2011). Lagos (Nigeria) flooding and influence of urban planning. *Journal of Urban Design and Planning.*, 164-3; 175-187.
- Anderson, R. M., Koren, V. I., and Reed, S. M. (2006). Using SSURGO data to improve Sacramento Model a priori parameter estimates. *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 103- 116.

- Bae, D.H., and Georgakakos, K.P. (1992). Hydrologic Modeling for Flow Forecasting and Climate Studies In Large Drainage Basins, University of Iowa, IIHR Report No. 360.
- Burnash, R., and Ferral, L. (2002). Conceptualization of the Sacramento Soil Moisture Accounting Model. NWSRFS User Manual Documentation, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, MD.
- De Roo, A., Gouweleeuw, B., Thielen, J., Bartholmes, J., Bongioannini-Cerlini, P., Todini, E., Bates, P., Horritt, M., Hunter, N., Beven, K., Pappenberger, F., Heise, E., Rivin, G., Hills, M., Hollingsworth, A., Holst, B., Kwadijk, J., Reggiani, P., van Dijk, M., Sattler, K., and Sprokkereef, E. (2003). Development of a European flood forecasting system. *Intl. J. River Basin Management*; 1: 49-59.
- Deltares (2013). SOBEK Manual. [http://www.deltaressystem.com/txmpub/files/?p\\_file\\_id=23070](http://www.deltaressystem.com/txmpub/files/?p_file_id=23070) Accessed in December 2013.
- Duarte, A.S.; Pinho, J.L.; Pardal, M.A.; Neto J.M.; Vieira, J.P.; Santos, F.S. (2001). Effect of residence times on River Mondego estuary eutrophication vulnerability. *Water Science and Technology*. Vol 44(2-3), pp. 329-336.
- EU (2007). Directive of the European Parliament and of the Council 2007/60/EC, establishing a framework for the assessment and management of flood risks. *Official Journal 2007 L 288/27*, European Commission, Brussels.
- Ferreira, R. (2010). Modelação de cheias em zonas urbanas. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.
- Grib (2013). <http://www.grib.us> Accessed in April 2013.
- Kitanidis, P.K and Bras, R.L. (1980). Real-Time Forecasting With a Conceptual Hydrologic Model 1. Analysis of Uncertainty, *WRR Vol. 16, No. 4*, pp. 1025-1033.
- Koren, V. I., Smith, M. B., Wang, D., and Zhang, Z. (2000). Use of Soil Property Data in the Derivation of Conceptual Rainfall-Runoff Model Parameters. 15th Conference on Hydrology, American Meteorological Society, Long Beach, California, 403.
- Penning-Roswell, E.C., Tunstall, S.M., Tapsell, S.M., and Parker, D.J. (2000). The benefits of flood warnings: real but elusive and politically significant. *J. Inst. Wat. Environ. Manage.*, 14: 7-14.
- Pinho, J.L.S. (2001). Application of Mathematical Modelling on the Study of the Hydrodynamics and Water Quality in Coastal Regions. PhD Thesis, University of Minho, Portugal (in Portuguese).
- Pinho, J.L.S., Vieira, J.M.P., Carmo, J.S.A. (2004). Hydroinformatic environment for coastal waters hydrodynamics and water quality modelling. *Advances in Engineering Software*; 35: 205-222.
- Pinho, J.L.S., and Vieira, J.M.P. (2005). Mathematical modeling of salt water intrusion in a Northern Portuguese estuary. Fourth Inter Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, Guimarães, Portugal.
- Renner, M., Werner, M.G.F., Rademacher, S., and Sprokkereef, E. (2009). Verification of ensemble flow forecasts for the River Rhine. *Journal of Hydrology*; 376: 463-475.
- Riverside (2013). Riverside Technology, inc. <http://www.riverside.com> Accessed in December 2013.
- Sprague, R.H., and Carlson, E.D. (1982). Building effective decision support systems. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall.
- Vieira, L. (2013). Towards a decision support system for flood management in a river basin. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.
- Vieira, J., Pinho, J. (2010). Distribuição salina na embocadura e estuário do rio Lima em diferentes regimes hidrodinâmicos. *Recursos Hídricos vol.31-02*: 5-14.
- Vieira, J., Pinho, J., Pinho, R., Araújo, J. (2012). A web based decision support system for water quality management in a large multipurpose reservoir. 10th International Conference on Hydroinformatics HIC 2012, Hamburg, Germany.
- Werner, M., van Dijk, M., and Schellekens, J. (2004). Delft FEWS: An open shell flood forecasting system, in Liang, Phoon and Babovic (Eds.) 6th International Conference on Hydroinformatics, Singapore, 1205-1212.
- Verwey, A. (2005). Hydroinformatics support to flood forecasting and flood management. Fourth Inter Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, Guimarães, Portugal.
- WL (2005). SOBEK – Reference Manual". Delft Hydraulics, Netherlands.