

AVALIAÇÃO VISUAL E NUMÉRICA DA CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO IPH II COM FINS EDUCACIONAIS

Juan Martín Bravo¹; Daniel Gustavo Allasia²; Walter Collischonn³; Rutinéia Tassi⁴; Adalberto Meller⁵ & Carlos Eduardo Morelli Tucci⁶

RESUMO --- A modelagem hidrológica utiliza modelos para estudar os complexos processos que o ciclo hidrológico engloba, sendo os modelos que simulam o processo de transformação da chuva em vazão os mais utilizados. Os modelos hidrológicos chuva-vazão possuem parâmetros que devem ser calibrados com base nas informações hidrológicas existentes na bacia. A apresentação visual dos resultados obtidos durante o processo de calibração resulta de grande utilidade durante essa etapa da modelagem hidrológica. Pode-se ainda destacar sua importância para fins didáticos, permitindo ao aluno compreender com maior facilidade os diversos conceitos envolvidos no processo de calibração de modelos chuva-vazão. Tendo em vista as vantagens da representação visual de resultados foi desenvolvido o programa WIN_IPH2, a mais recente versão do conhecido modelo chuva-vazão IPH II, que acopla a esse modelo dois métodos numéricos de otimização. O programa WIN_IPH2 permite a calibração manual e a calibração automática do modelo IPH II, sendo os resultados apresentados através de diferentes interfaces em formas de gráficos e animações. Nesse trabalho são apresentadas as flexibilidades deste programa e avaliado seu desempenho em diferentes situações práticas.

ABSTRACT --- Rainfall-runoff models are the mostly used models in hydrological modeling. These models have parameters that need to be calibrated based on hydrological information of the basin. Visual representation of partial results during the calibration process has great utility for users. Still, can be very useful for educational issues, allowing student to understand in a simple way different concepts involved on the calibration process of rainfall-runoff models. In view of the advantages of the visual representation of results was developed the WIN_IPH2 program, the most recently version of the well-known Brazilian IPH II rainfall-runoff model combined to two numerical methods for automatic calibration. WIN_IPH2 allows manual and automatic calibration of IPH II, being the results presented through different interfaces in the forms of graphs and animations. This study shows WIN_IPH2 capabilities and assesses the skill of WIN_IPH2 on solving diverse practical situations.

Palavras-chave: Calibração de modelos hidrológicos, técnicas visuais, WIN_IPH2.

¹ Doutorando do Programa de pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental IPH/UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP: 90650-001. Porto Alegre, RS. E-mail: jumarbra@yahoo.com.ar

² Doutorando do Programa de pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental IPH/UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP: 90650-001. Porto Alegre, RS. E-mail: hidrologia@gmx.net

³ Professor Adjunto IPH / UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP: 90650-001. Porto Alegre, RS. E-mail: collischonn@iph.ufrgs.br

⁴ Professora Adjunta Setor de Hidráulica e Saneamento, FURGS. Rio Grande, RS. E-mail: rutineia@gmail.com

⁵ Doutorando do Programa de pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental IPH/UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP: 90650-001. Porto Alegre, RS. E-mail: betomeller@uol.com.br

⁶ Professor Titular IPH / UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP: 90650-001. Porto Alegre, RS. E-mail: tucci@iph.ufrgs.br

1. INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema, através do qual uma variável de entrada, como a precipitação, é transformada em uma variável de saída (a vazão), pelos diversos processos do ciclo hidrológico. Uma das maneiras de representar esse processo é através da modelagem hidrológica.

Os complexos processos do ciclo hidrológico podem ser representados por meio da modelagem hidrológica, sendo os modelos que simulam o processo de transformação da chuva em vazão os mais utilizados. Esses modelos são baseados em equações matemáticas que descrevem, de forma simplificada, o comportamento hidrológico da bacia. Entre os usos dos modelos hidrológicos chuva-vazão, Tucci (1998) destaca que os mesmos são utilizados para: (1) melhor entender o comportamento dos fenômenos hidrológicos na bacia; (2) dimensionamento e previsão de cenários hidrológicos de planejamento; (3) análise de consistência e preenchimento de falhas nos dados observados; (4) análise dos efeitos resultantes de modificação do uso do solo na bacia e (5) previsão de variáveis hidrológicas (por exemplo, a vazão) em tempo real.

Os modelos hidrológicos chuva-vazão possuem parâmetros que caracterizam o sistema (Tucci, 1998). Alguns desses parâmetros representam abstrações da realidade e, em consequência, não podem ser medidos. Nessas circunstâncias, o ajuste dos valores dos parâmetros é realizado através do processo de calibração, com base nas informações hidrológicas existentes na bacia. O processo de calibração também é aplicado aos casos de utilização de parâmetros que, embora possam ser medidos em campo, muitas vezes não são determinados diretamente em função do custo, disponibilidade de tempo, entre outros.

O objetivo da calibração é encontrar os valores dos parâmetros utilizados na modelagem que permitam uma boa representação do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica. O processo de verificação da qualidade da calibração normalmente é realizado através de diferentes medidas de desempenho que levam em conta o erro entre os valores observados e simulados de uma variável (por exemplo, a vazão no exutório da bacia). Ainda esses valores observados e simulados podem ser comparados através de uma inspeção visual, onde o usuário, baseado em sua experiência, decide se o resultado foi satisfatório ou não.

A apresentação visual dos resultados obtidos durante o processo de calibração é de grande utilidade durante essa etapa da modelagem hidrológica. Pode-se destacar ainda sua importância para fins didáticos, permitindo ao aluno compreender com maior facilidade os diversos conceitos envolvidos no processo de calibração de modelos chuva-vazão.

Tendo em vista as vantagens da representação visual dos resultados de calibração foi desenvolvido o programa WIN_IPH2 (Bravo *et al.*, 2006a); a mais recente versão do conhecido modelo chuva-vazão IPH II. O programa WIN_IPH2 permite a calibração manual e a calibração

automática do modelo IPH II, apresentando os resultados através de diferentes interfaces em formas de gráficos e animações. O objetivo principal deste trabalho é avaliar o desempenho do programa WIN_IPH2 frente a diferentes situações práticas.

2. O MODELO IPH II E O PROGRAMA WIN_IPH2

2.1. Evolução histórica do modelo IPH II

O IPH II é um modelo hidrológico chuva-vazão, do tipo concentrado, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Conforme Tucci (1998), o modelo IPH II é baseado no algoritmo de separação do escoamento desenvolvido por Berthelot (1970), que utilizou a equação da continuidade combinada com a equação de infiltração de Horton e uma função empírica para a percolação. Berthelot *et al.* (1972), Sanchez (1972) e Muñoz e Tucci (1974) utilizaram este algoritmo para compor um modelo chuva-vazão. Posteriormente, Tucci *et al.* (1981) utilizaram o referido algoritmo em conjunto com outros (perdas, escoamento superficial e subterrâneo) e implementaram o modelo IPH II. Finalmente, Tucci e Campana (1993) ampliaram o uso do modelo IPH II através de modificações na estrutura do algoritmo de escoamento superficial. O modelo IPH II tem sido aplicado, desde então, em diversas bacias brasileiras apresentando bons resultados.

Recentemente foi desenvolvido o programa WIN_IPH2 (Bravo *et al.*, 2006a) que acopla as versões do modelo IPH II para simulação de séries contínuas e eventos isolados a dois algoritmos de otimização. Essa nova versão apresenta uma interface mais amigável, integralmente programada como uma aplicação QuickWin de Visual Fortran; assim, o novo modelo tem características do ambiente Windows e uma saída gráfica de resultados.

O programa WIN_IPH2 foi pensado para facilitar a calibração do modelo IPH II aplicado a séries contínuas ou eventos isolados. Opções de calibração manual e automática encontram-se disponíveis no programa.

A calibração manual é realizada pelo usuário, em um processo de tentativas, utilizando valores dos parâmetros medidos em campo, ou ainda arbitrando valores até que o resultado obtido seja considerado satisfatório. No caso de calibração automática, o algoritmo SCE-UA (Duan *et al.*, 1992) é utilizado na calibração automática monobjetivo, enquanto o algoritmo MOCOM-UA (Yapo *et al.*, 1998) é utilizado na calibração automática multiobjetivo. Dessa forma, no desenvolvimento do programa, foram incorporadas a versões em Fortran do algoritmo SCE-UA adaptada e testada por Collischonn e Tucci (2001) e do algoritmo MOCOM-UA adaptada e testada por Collischonn e Tucci (2003). Além da possibilidade de calibração de parâmetros, o programa WIN_IPH2 pode ser utilizado simplesmente para simulação do modelo IPH II, com um conjunto de parâmetros previamente calibrado ou escolhido pelo usuário.

Além de atender aos requisitos de um modelo hidrológico tradicional, utilizado para representar o processo de transformação chuva-vazão (podendo ser utilizado para diferentes propósitos), o programa WIN_IPH2 é sumamente didático para fins educacionais, uma vez que todos os resultados obtidos são apresentados na tela através de diferentes gráficos e animações.

2.2. Breve descrição do modelo IPH II

O modelo IPH II é composto dos seguintes algoritmos (Tucci, 1998; Tassi *et al.*, 2006):

- Perdas por evaporação e interceptação;
- separação do escoamento;
- propagação dos escoamentos superficial e subterrâneo.

O algoritmo de perdas utiliza um único parâmetro (R_{max}), que reflete a capacidade de armazenamento máximo em um reservatório de perdas. O algoritmo de separação do escoamento utiliza os parâmetros I_0 , I_b e h , característicos da equação de infiltração de Horton. Os parâmetros I_0 e I_b representam as capacidades inicial e mínima de infiltração do solo, respectivamente, e h é igual a e^{-k} , sendo e a base dos logaritmos neperianos e k um parâmetro empírico, relacionado ao tipo de solo.

A propagação do escoamento superficial no modelo é feita através do método de Clark, que utiliza os parâmetros tempo de concentração (tc) e o histograma tempo-área. Esses parâmetros podem ser calibrados ou mantidos fixos, de acordo com a disponibilidade de informações sobre as características físicas da bacia. Adicionalmente, para se levar em consideração o efeito do armazenamento na bacia, o modelo utiliza a teoria do reservatório linear simples, caracterizada pelo parâmetro K_s , que representa o tempo de retardo do escoamento superficial. Para a propagação do escoamento superficial é necessário definir também o percentual de área impermeável (A_{inp}) na bacia hidrográfica.

A propagação do escoamento subterrâneo é realizada através do modelo reservatório linear simples, caracterizado pelo parâmetro K_{sub} , que representa o tempo médio de esvaziamento do reservatório de escoamento subterrâneo. O modelo IPH II foi originalmente desenvolvido para simulação de eventos, entretanto, para simulação de séries contínuas de longo período, os autores introduziram um parâmetro adicional denominado α . Esse parâmetro participa do processo de separação do escoamento nos casos em que a precipitação é menor que a capacidade de infiltração.

Além dos parâmetros acima citados, para a simulação devem ser informadas a área da bacia hidrográfica e as variáveis de entrada: precipitação e evaporação. Maiores informações a respeito do modelo IPH II podem ser encontradas em Tucci (1998), Mine (1998), Villanueva *et al.* (2005) e Bravo *et al.* (2006b).

3. O PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DE MODELOS CHUVA-VAZÃO

Na modelagem hidrológica do processo de transformação de chuva em vazão se apresentam, geralmente, dois problemas: 1) a escolha do modelo que representará melhor o comportamento hidrológico da bacia; 2) a definição dos valores dos parâmetros do modelo que permitem obter valores simulados próximos aos valores observados.

Esse último problema é resolvido através da *calibração*, entendida como o processo de busca dos valores ótimos dos parâmetros do modelo hidrológico. Dessa forma, a calibração é um processo de otimização no qual as variáveis de decisão são os parâmetros do modelo.

A calibração é uma técnica de otimização na qual os valores dos parâmetros de um modelo hidrológico são modificados pelo usuário ou através de uma técnica numérica, com o objetivo de encontrar uma boa concordância entre os valores calculados (simulados) e os valores observados das variáveis de saída (por exemplo, a vazão nos rios).

Três conceitos importantes, brevemente descritos a seguir, devem ser sempre considerados durante o processo de calibração de modelos hidrológicos: (a) Equifinalidade; (b) Parcimônia; (c) Representatividade dos dados utilizados.

Na modelagem hidrológica não existe um único conjunto de parâmetros capaz de representar todos os processos hidrológicos, devido a incertezas: nos dados, nas simplificações do modelo e na representatividade dos valores dos parâmetros. O conceito de equifinalidade, introduzido por Beven e Binley (1992), estabelece a possibilidade de existência de vários conjuntos de parâmetros que de forma apropriada resultarão na resposta desejada. Esse conceito é oriundo da geomorfologia, onde estabelece que formas de superfícies terrestres (vales, montanhas, etc.) similares podem ter sua origem em processos completamente diferentes. Assim, considerando unicamente a forma da superfície terrestre é difícil identificar o processo que a originou (Beven, 2006). Sua analogia na calibração de modelos chuva-vazão substitui as formas das superfícies terrestres por hidrogramas (geralmente) e os processos pelos parâmetros do modelo.

Por sua vez, o princípio de parcimônia estabelece que os modelos devem ter o menor número de parâmetros que permitam uma representação apropriada do comportamento hidrológico da bacia. Muitas vezes ao incrementar o grau de complexidade dos modelos hidrológicos (por exemplo aumentando o número de parâmetros) observa-se que não há melhora significativa no desempenho do modelo em termos de uma melhor reprodução do comportamento hidrológico da bacia (Wagner *et al.*, 2004; Perrin *et al.*, 2001).

Por fim, os resultados da calibração estão intimamente ligados à quantidade, qualidade e representatividade dos dados utilizados. É importante destacar que nenhum modelo cria informação sobre uma bacia, o modelo tem a finalidade de explorar melhor as informações existentes (Tucci, 1998).

Sorooshian e Gupta (1995) mostraram que dois a três anos de dados diários são suficientes para a calibração de um modelo chuva-vazão com intervalo de simulação também diário. Entretanto, é importante destacar que a quantidade de dados parece depender da complexidade do modelo (em termos do número de parâmetros a ser estimados) e da qualidade e características dos dados (Wagener *et al.*, 2004).

Com relação à qualidade e representatividade dos dados utilizados na calibração, dois aspectos devem ser verificados: 1) o período de dados deve apresentar suficiente variabilidade no comportamento hidrológico da bacia, para que os diferentes processos sejam corretamente representados pelo modelo hidrológico; 2) a presença de erros na medição dos dados.

3. CALIBRAÇÃO MANUAL

Uma das técnicas pioneiras de calibração de modelos chuva-vazão é a calibração manual por tentativa e erro. Essa técnica consiste num processo iterativo, onde o usuário altera os valores dos parâmetros do modelo a cada tentativa. Dessa forma, o usuário utiliza um conjunto de parâmetros diferentes a cada tentativa ao utilizar o modelo hidrológico. A cada tentativa, compara visualmente os resultados obtidos com os valores medidos com o objetivo de verificar se conseguiu uma melhor representação do sistema. Em caso afirmativo, os valores dos parâmetros continuam sendo modificados nessa direção; caso contrário, uma nova direção é testada. Esse processo iterativo prossegue até que o usuário encontre um conjunto de parâmetros que, conforme sua percepção, leve aos resultados mais apropriados para o processo simulado.

Uma das grandes vantagens desse procedimento é permitir que o usuário agregue ao processo sua experiência e conhecimento sobre o modelo. Porém, em função do grande número de vezes que os valores dos parâmetros devem ser modificados, essa abordagem pode não ser recomendada em modelos complexos que envolvem um grande número de parâmetros (Mays e Tung, 1992; Fletcher e Ponnambalam, 1998).

Na calibração manual de modelos chuva-vazão a variável de saída é geralmente a vazão. Dessa forma, o usuário normalmente analisa o ajuste de vazões mínimas, a forma do hidrograma calculado, o ajuste dos picos de cheias em termos de valor máximo, volume, forma e tempo de ocorrência (Collischonn e Allasia, 2006).

A seguir são apresentados os resultados do programa WIN_IPH2 no processo de calibração manual de uma bacia de 901 km². O intervalo de tempo utilizado na simulação é de um dia e o período utilizado para calibração abrange aproximadamente 300 dias. Como o modelo será posteriormente utilizado para o preenchimento de falhas deseja-se, nesse processo, valores dos parâmetros que permitam uma boa representação do comportamento hidrológico geral dessa bacia.

A Figura 1 apresenta os resultados que poderiam ser obtidos no início do processo de calibração manual a partir de valores viáveis dados pelo usuário ao conjunto de parâmetros. Observa-se nessa figura que os picos dos hidrogramas (1) são, na maior parte do tempo, superestimados; a subida (4) e descida (2) dos hidrogramas não são bem representadas, e as estiagens (3) estão subestimadas, na maior parte do tempo. Ainda observa-se uma subestimativa do volume, que fica mais evidente na curva de permanência (apresentada no canto inferior direito da Figura 1). O gráfico de correlação entre os valores de vazão observados e calculados (apresentado imediatamente à esquerda da curva de permanência da Figura 1) mostra que existe uma tendência do modelo em subestimar as vazões mais baixas e a superestimar as vazões mais elevadas.

O usuário posteriormente modifica os valores dos parâmetros com o objetivo de melhorar os resultados iniciais através de um processo de tentativa e erro. Por fim, os resultados finais do processo de calibração manual poderiam ser os apresentados na Figura 2. Nesse instante, o usuário considerou que os resultados obtidos são bons e, por consequência, esse conjunto de parâmetros será posteriormente utilizado na etapa de validação do modelo.

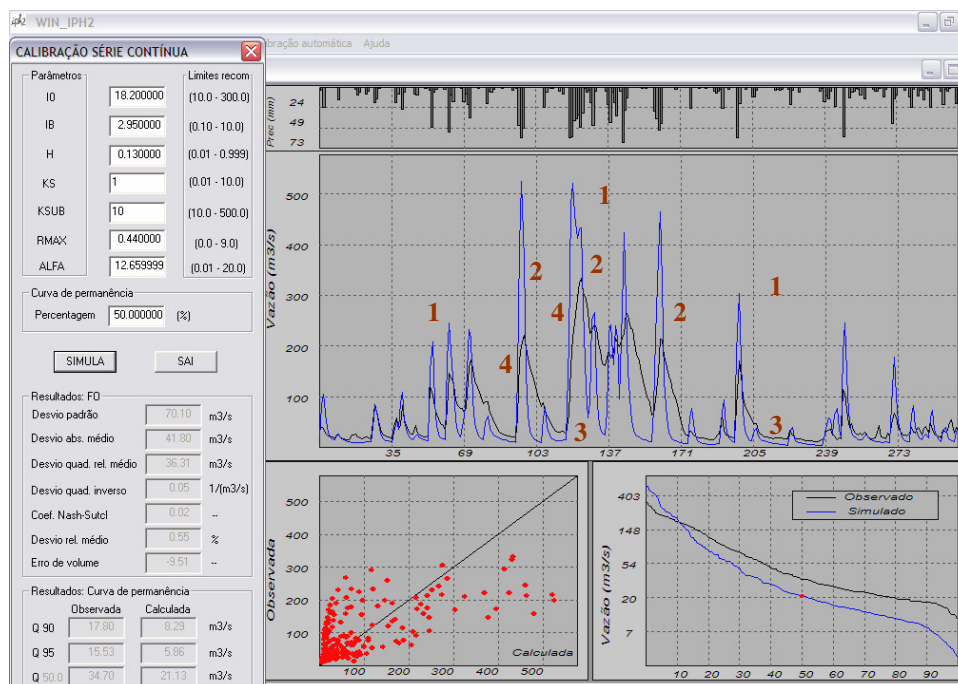


Figura 1. Resultados no início do processo de calibração manual do modelo IPH II.

Observa-se na Figura 2 que existe uma melhora substancial do desempenho do modelo com esse conjunto final de parâmetros. Os picos, subidas e descidas dos hidrogramas são bem representados. As vazões na estiagem apresentam também valores muito próximos aos observados. Observa-se ainda que pelas próprias simplificações do modelo não se alcança uma representação do 100% do comportamento hidrológica da bacia, mas o resultados podem ser considerados satisfatórios.

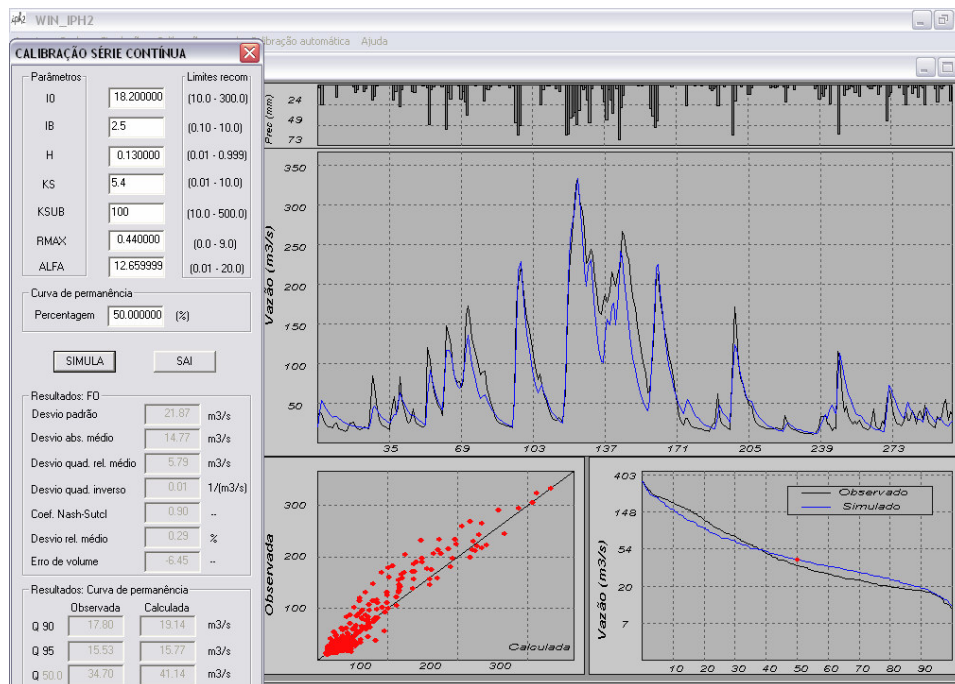


Figura 2. Resultados no final do processo de calibração manual do modelo IPH II.

4. CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA

A calibração manual pode ser um processo muito lento, repetitivo e tedioso, especialmente quando o modelo utilizado tem um grande número de parâmetros e o usuário é inexperiente (Collischonn e Tucci, 2003). Isto acontece porque é difícil deduzir a lógica pela qual os parâmetros deveriam ser ajustados para melhorar a representação (Sorooshian e Gupta, 1995).

Uma das principais deficiências da calibração manual é a falta de um critério de comparação mensurável que considere todas as características analisadas visualmente, tornando difícil dessa forma, saber quando interromper o processo de calibração (Sorooshian e Gupta, 1995). Além disso, o processo de calibração manual utiliza critérios subjetivos, dessa forma diferentes usuários do modelo podem obter um conjunto de parâmetros completamente diferente para uma mesma bacia.

Com o objetivo de tornar mais rápido e eficiente o processo de calibração foram desenvolvidos algoritmos de otimização que se baseiam na utilização intensiva de computadores para a calibração *automática* de modelos hidrológicos. Nesse sentido, desde a década de 60 diferentes técnicas para a calibração automática de modelos hidrológicos têm sido desenvolvidas. Atualmente, um grande número de técnicas encontram-se disponíveis. Um procedimento típico para estimar os valores de parâmetros de modelos chuva-vazão considera os seguintes elementos principais: 1) a função-objetivo; 2) o algoritmo de otimização; 3) o critério de parada.

Uma função-objetivo é uma medida de desempenho do problema analisado. No caso da calibração de modelos chuva-vazão, a função-objetivo é uma equação utilizada para calcular uma medida numérica da diferença (erro) entre os resultados do modelo (geralmente um hidrograma) e os valores observados dessa mesma variável de saída. Assim, o propósito da calibração automática

é encontrar aqueles valores dos parâmetros do modelo que otimizam (maximizam ou minimizam) a função-objetivo. Quando otimizado o valor de uma única função-objetivo, o processo de calibração automática é denominado *monobjetivo*. Entretanto, quando otimizado o valor de dois ou mais funções-objetivo, o processo de calibração automática é denominado *multiobjetivo*.

Existe um grande número de funções-objetivo utilizadas na calibração automática de modelos chuva-vazão. Na Tabela 1 são apresentadas as equações das sete funções-objetivo disponibilizadas no programa WIN_IPH2, tanto para calibração automática monobjetivo ou multiobjetivo.

Tabela 1. Funções-objetivo para calibração automática no programa WIN_IPH2.

Nome	Equação
Desvio padrão *	$FO1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NT} (Qo_i - Qc_i)^2}{NT}}$
Desvio absoluto médio *	$FO2 = \frac{\sum_{i=1}^{NT} Qo_i - Qc_i }{NT}$
Desvio quadrado relativo médio *	$FO3 = \frac{\sum_{i=1}^{NT} \frac{(Qo_i - Qc_i)^2}{Qo_i}}{NT}$
Desvio padrão do inverso das vazões *	$FO4 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NT} \left(\frac{1}{Qo_i} - \frac{1}{Qc_i}\right)^2}{NT}}$
Coefficiente de Nash e Sutcliffe *	$FO5 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{NT} (Qo_i - Qc_i)^2}{\sum_{i=1}^{NT} (Qo_i - \bar{Q})^2}$
Desvio relativo médio *	$FO6 = \frac{\sum_{i=1}^{NT} \frac{ Qo_i - Qc_i }{Qo_i}}{NT}$
Erro de volume *	$FO7 = \frac{\sum_{i=1}^{NT} Qc_i - \sum_{i=1}^{NT} Qo_i}{\sum_{i=1}^{NT} Qo_i} * 100$

* Qo_i é o valor de vazão observada no intervalo de tempo i , Qc_i é o valor de vazão calculada no intervalo de tempo i , NT é o número de intervalos de tempo da série analisada e \bar{Q} é a vazão média da série.

A superfície descrita pela função-objetivo no espaço dos parâmetros é conhecida como *superfície de resposta* (Sorooshian e Gupta, 1995). Um algoritmo de otimização é um procedimento lógico que é utilizado para buscar na superfície de resposta os valores dos parâmetros que otimizam (maximizam ou minimizam) o valor da função-objetivo considerando a faixa de valores viáveis de cada parâmetro. Quando se trata de calibração de modelos hidrológicos, as técnicas numéricas

(iterativas) de otimização são as mais utilizadas porque, normalmente, a função-objetivo resultante do uso destes modelos é implícita (Tucci, 1998).

A calibração automática utiliza critérios mais objetivos para definir o final do processo de calibração. Sorooshian e Gupta (1995) apresentaram os seguintes critérios de parada: (a) convergência da função-objetivo; (b) convergência dos valores dos parâmetros; (c) número máximos de iterações.

No programa WIN_IPH2 é utilizado o algoritmo SCE-UA (Shuffled Complex Evolution – University of Arizona; Duan *et al.*, 1992) para a calibração automática monobjetivo do modelo IPH II. Trata-se de um algoritmo de evolução de uma população (técnica numérica), com características semelhantes a um algoritmo genético. Este algoritmo tem apresentado excelentes resultados na calibração automática monobjetivo de modelos hidrológicos (Duan *et al.*, 1992; Sorooshian *et al.*, 1993; Duan *et al.*, 1994; Sorooshian e Gupta, 1995; Gan e Biftu, 1996; Collischonn e Tucci, 2001a; Abdulla *et al.*, 1999; Diniz, 1999; Thyer *et al.*, 1999 e Madsen, 2000).

O algoritmo SCE-UA foi criado por Duan *et al.* (1992) como uma combinação da estratégia de busca do método Simplex de Nelder e Mead, com conceitos de busca aleatória supervisionada, evolução competitiva e mistura de complexos.

O algoritmo opera com uma população de pontos que evolui em direção ao ótimo global de uma única função, através de sucessivas iterações e avaliações da função-objetivo. Na etapa inicial é gerada, de forma aleatória, uma população de pontos espalhados entre os limites máximos e mínimos definidos para cada parâmetro. Essa população é separada em conjuntos (chamados de complexos) que evoluem baseados em um processo de “reprodução”.

Os dois parâmetros próprios do algoritmo SCE-UA que devem ser definidos pelo usuário são: o número de complexos e o número de indivíduos em cada complexo. O produto entre esses dois valores define o número de indivíduos da população. Quanto maior a população, maiores são as chances de encontrar o ótimo global da função-objetivo, porém maior é o tempo de processamento e o número de iterações necessárias para a convergência do algoritmo. Maiores informações acerca do algoritmo SCE-UA podem ser encontradas em Duan *et al.* (1992), Diniz (1999) e Collischonn e Tucci (2001).

A seguir é apresentado um processo de calibração automática monobjetivo utilizando o programa WIN_IPH2. O exercício de aplicação considera os mesmos dados utilizados no exemplo de calibração manual. Numa primeira etapa foi selecionada a FO5 (Tabela 1) sendo obtidos os resultados apresentados na Figura 3. Nessa figura podem ser observados à esquerda os valores dos parâmetros obtidos por calibração e no gráfico superior os valores normalizados correspondentes. Ainda são apresentados dois gráficos (na parte inferior) que apresentam a evolução do valor da função-objetivo e das soluções próximas do valor ótimo em função do número de iterações. Esse

gráficos são de grande utilidade na avaliação do desempenho do algoritmo SCE-UA na resolução do problema de otimização.

O resultado da simulação com os parâmetros obtidos por calibração automática monobjetivo considerando a maximização da FO5 é apresentado na Figura 4. Observa-se nessa figura que existe um bom ajuste dos picos, subidas e descidas dos hidrogramas. O volume parece também apresentar um bom ajuste. Já os períodos de estiagem são superestimados na maior parte do tempo. Isto parece indicar que essa função-objetivo dá um maior peso ao ajuste de vazões mais altas nesse exemplo.

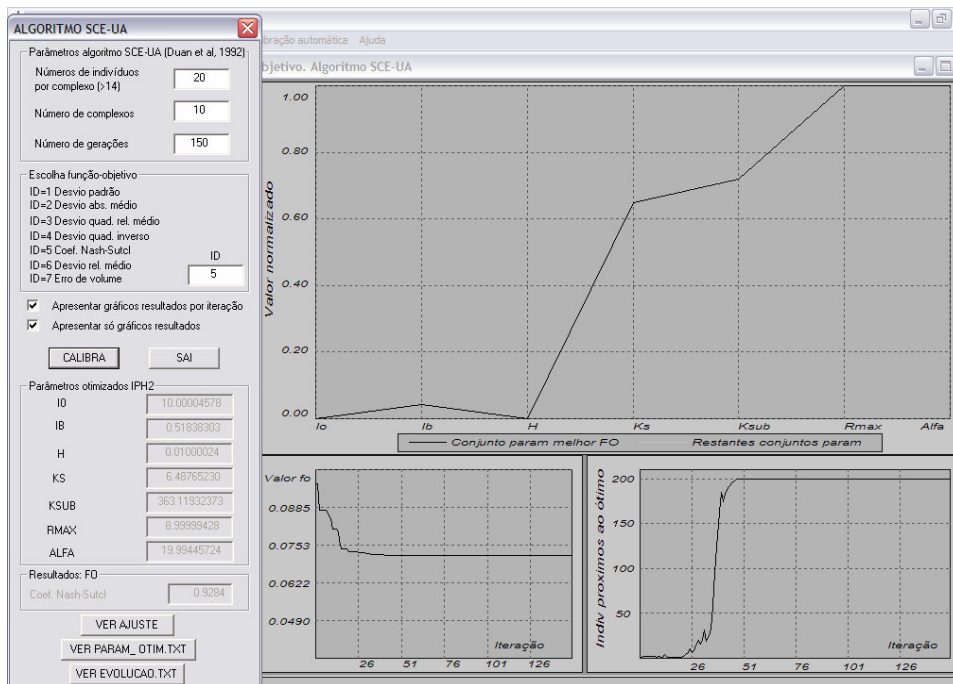


Figura 3. Resultados do processo de calibração automática monobjetivo (FO5) do modelo IPH II.

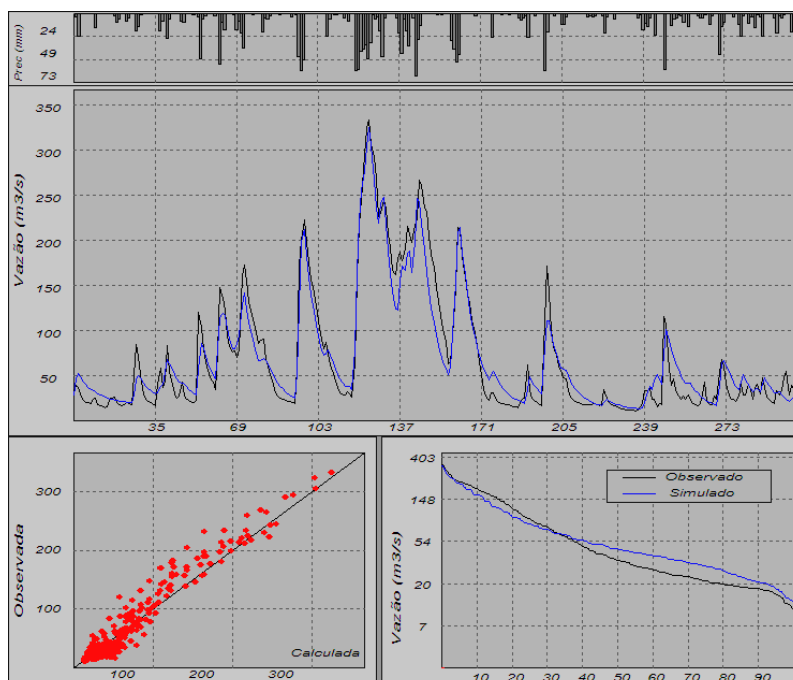


Figura 4. Ajuste alcançado utilizando os parâmetros obtidos por calibração automática (FO5).

O programa WIN_IPH2 disponibiliza uma opção de visualização de animações durante o processo de calibração automática monobjetivo. Nessa opção é possível observar a forma com que o algoritmo SCE-UA vai convergindo a uma solução ótima. Na Figura 5 é apresentada uma seqüência de gráficos que mostram a evolução dos valores do conjunto de parâmetros otimizados a medida que cresce o número de iterações.

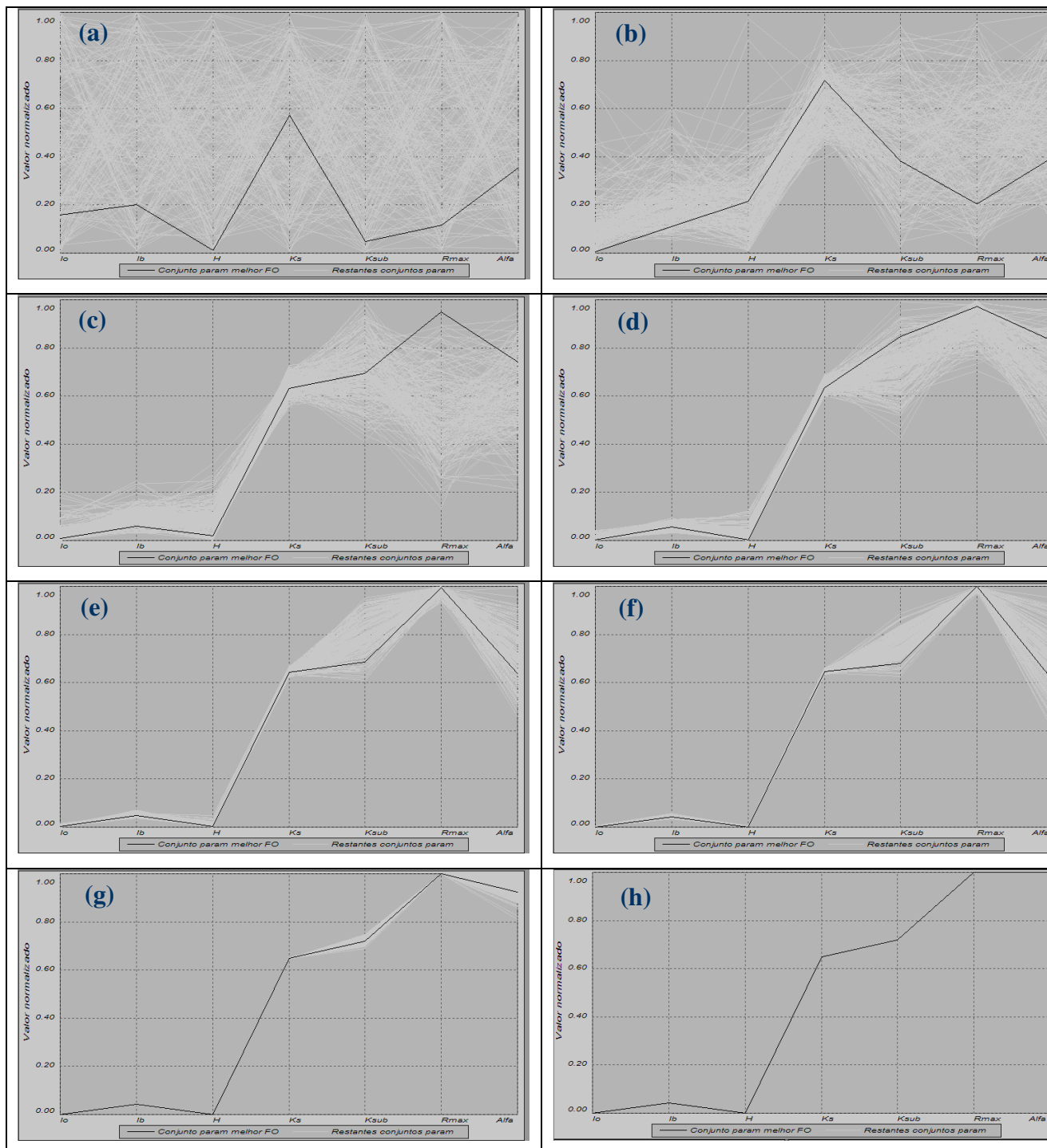


Figura 5. Resultados do processo de calibração automática monobjetivo do modelo IPH II em diferentes iterações: (a) inicial (iteração 1); (b) 10; (c) 20; (d) 30; (e) 40; (f) 50; (g) 80; (h) 150;

Nos diferentes gráficos apresentados na Figura 5, cada linha unindo os valores normalizados (ordenada) de cada parâmetro do modelo IPH II (abscissa) representa um indivíduo da população

utilizada pelo algoritmo SCE-UA. Linhas de cor cinza representam aos indivíduos cujo valor da função-objetivo é maior (na minimização) que o menor valor encontrado até essa iteração (linha de cor preta). Dessa forma, o algoritmo SCE-UA parte de uma população de indivíduos definida aleatoriamente (iteração 1), e à medida que vai crescendo o numero de iterações, essa população converge a uma solução ótima. No exemplo analisado isso ocorre próximo da iteração 150.

O processo de calibração automática monobjetivo foi repetido para cada uma das sete funções-objetivo definidas na Tabela 1. Os valores otimizados normalizados dos parâmetros obtidos são apresentados na Figura 6.

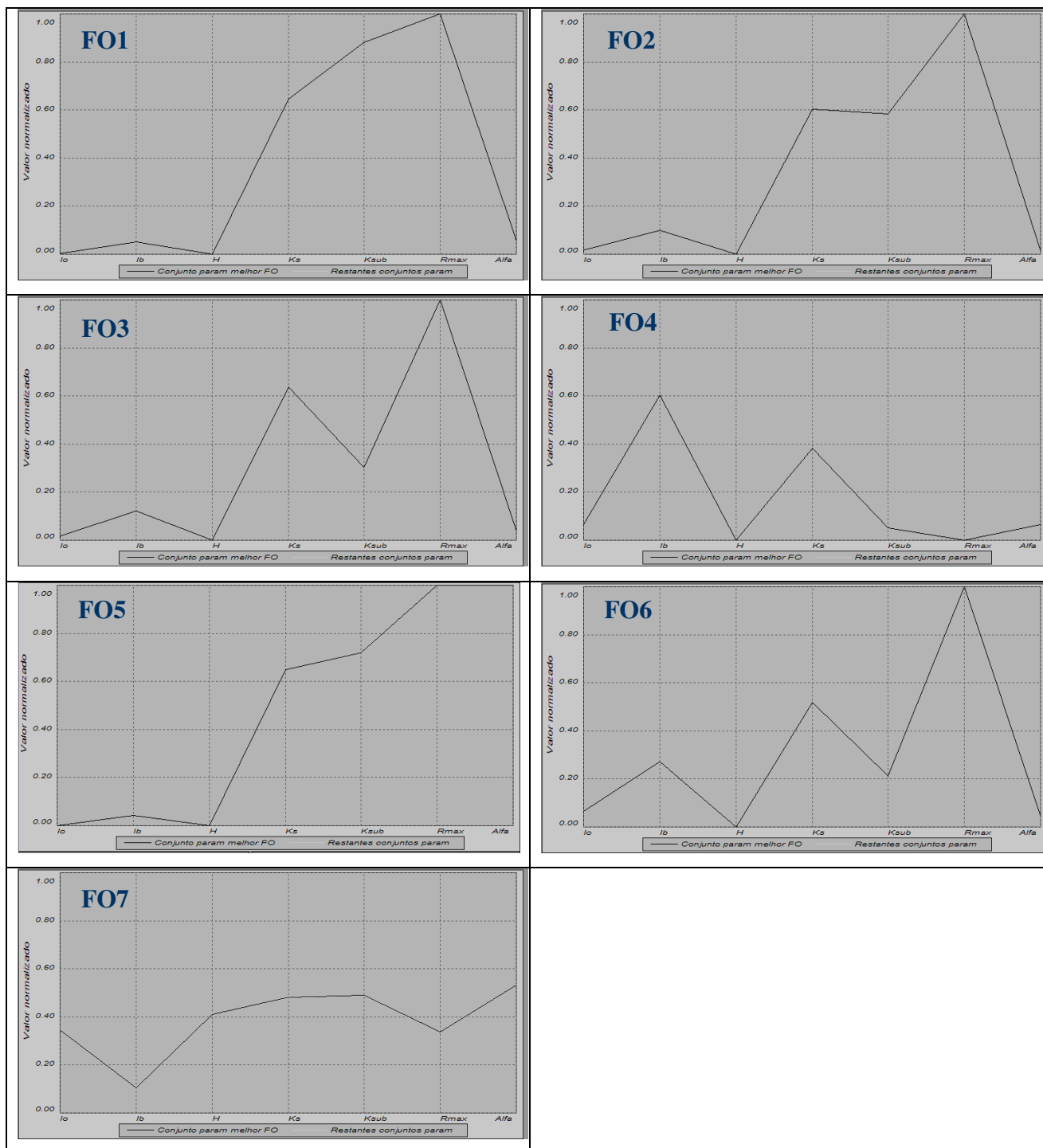


Figura 6. Valores otimizados normalizados dos parâmetros do modelo IPH II para funções-objetivo da Tabela 1.

Com base na comparação dos resultados apresentados nos gráficos da Figura 6 e na comparação dos ajustes obtidos com base nesses conjuntos de parâmetros apresentados na Figura 4, Figura 7 e Figura 8, pode-se observar a influência da escolha da função-objetivo na calibração automática de modelos chuva-vazão. Cada função-objetivo dá maior peso ao ajuste de diferentes partes do hidrograma observado resultando em diferentes valores otimizados do conjunto de parâmetros com os quais se consegue uma boa representação.

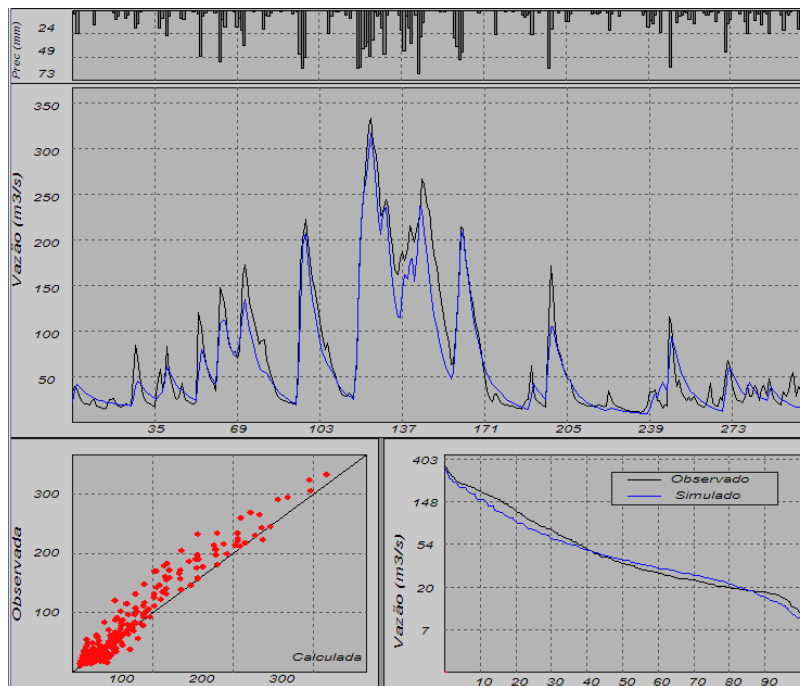


Figura 7. Ajuste alcançado utilizando os parâmetros obtidos por calibração automática (FO3).

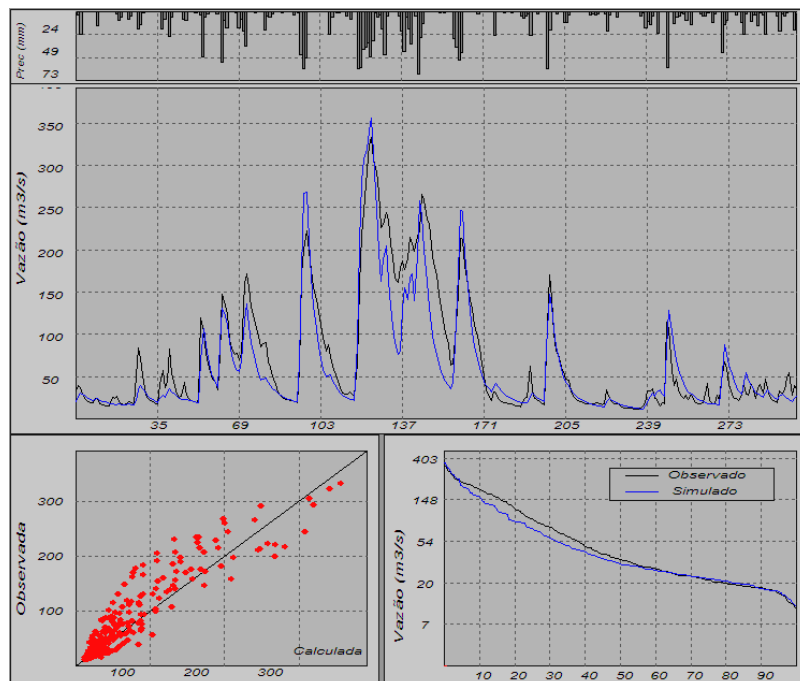


Figura 8. Ajuste alcançado utilizando os parâmetros obtidos por calibração automática (FO4).

5. INCERTEZAS NA CALIBRAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS

A experiência com modelos hidrológicos mostra que nenhuma técnica de calibração e nenhum modelo alcançam uma perfeita concordância entre os valores calculados e observados (Collischonn e Allasia, 2006). Existem erros nos dados medidos, na estrutura do modelo e nos parâmetros obtidos por calibração, que geram incerteza nos resultados calculados pelo modelo. Além disso, devem ser considerados os erros existentes nas condições iniciais da simulação. É importante levar em conta que, no caso hipotético, em que esses erros são corrigidos, ainda existirá a aleatoriedade do processo natural. Essa aleatoriedade introduz incertezas nos resultados do modelo que não poderão ser eliminadas (Wagener *et al.*, 2004).

Quando os modelos são utilizados para simular o comportamento hidrológico das bacias, podem existir, pelo menos, quatro tipos de incertezas: 1) incertezas na medição das variáveis (dados); 2) incertezas na estimativa dos parâmetros (resultados da calibração); 3) incertezas na estrutura do modelo; 4) incertezas nas condições iniciais da simulação (Wagener *et al.*, 2004).

A incerteza nos dados utilizados nos modelos hidrológicos tem sua origem na própria natureza aleatória dos fenômenos climáticos e aos erros de medição. Os erros de medição podem ser provocados por falta de precisão, erros humanos, etc. Podem ser ainda introduzidos erros devidos à discretização espacial ou temporal considerada (por exemplo, os dados de precipitação são geralmente pontuais e são utilizados para estimar médias sobre uma superfície ao redor do posto pluviométrico).

A incerteza na estimativa dos parâmetros é consequência das outras incertezas e do próprio método utilizado na calibração. A incerteza nos dados influencia a determinação dos valores calibrados dos parâmetros. Por exemplo, erros na medição da precipitação sobre a bacia acabam se refletindo nos valores dos parâmetros calibrados. Numa aplicação do modelo chuva-vazão numa situação com dados de precipitação de baixa qualidade, os valores dos parâmetros obtidos por calibração compensam, parcialmente a baixa qualidade dos dados. Embora seja possível alcançar bons resultados no período de calibração, o modelo calibrado desta forma será menos aplicável para extensão da série de vazão ou para o cálculo dos hidrogramas em locais sem dados de vazão medidos (Andréassian *et al.*, 2001).

As incertezas na estrutura do modelo se devem às próprias simplificações admitidas em sua representação do sistema. Modelos mais complexos (maior número de parâmetros) podem conseguir melhores resultados em termos de uma função-objetivo qualquer, mas sempre é importante lembrar o princípio de parcimônia, porque a melhora nos resultados pode ser relativamente baixa em comparação do aumento de incerteza introduzida pelo maior número de parâmetros utilizados.

Por fim, o estado do sistema no instante inicial a partir do qual o modelo hidrológico inicia a simulação não é totalmente conhecido. Entretanto, essas incertezas nas condições iniciais podem ser minimizadas utilizando um período de *aquecimento* do modelo (os resultados desse período não influenciam os valores das funções-objetivo) que permite reduzir os eventuais erros existentes nas condições iniciais (Wagener *et al.*, 2004).

6. AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS NOS PARÂMETROS CALIBRADOS

Existe um grande número de métodos para avaliar as incertezas nos valores dos parâmetros calibrados. Destacam-se, a simulação utilizando o método Monte Carlo (Melching, 1995), a metodologia GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) introduzida por Beven e Binley (1992) e diferentes metodologias baseadas na calibração multiobjetivo de modelos hidrológicos (por exemplo, Yapo *et al.* (1998); Gupta *et al.* (1998); Boyle *et al.* (2000); Madsen (2000); Vrugt *et al.*, 2003).

A calibração multiobjetivo consiste em encontrar os valores ótimos do conjunto de parâmetros considerando várias funções-objetivo. Uma característica importante do resultado de um processo de calibração multiobjetivo é que, geralmente, não existe uma única solução (único conjunto de parâmetros).

Ao considerar várias funções-objetivo, o processo de calibração multiobjetivo apresenta um caráter vetorial, existindo dois grupos de soluções: 1) soluções dominadas, que considerando todas as funções-objetivo serão piores que as outras soluções; 2) soluções não dominadas ou de Pareto ótimas, que quando comparadas com todas as outras, serão melhores numa ou mais funções-objetivo e piores em outra ou outras. O grupo de soluções não-dominadas é o alvo principal da calibração multiobjetivo. Esse grupo forma uma superfície (no espaço das funções-objetivo) conhecida como região de Pareto. A região de Pareto define o *trade-off* entre as funções-objetivo, e é definida sem estabelecer uma preferência relativa subjetiva para minimizar (ou maximizar) alguma das funções-objetivo a custo de outras.

No programa WIN_IPH2 é utilizado o algoritmo MOCOM-UA (Multi-Objective Complex Evolution Method – University of Arizona; Yapo *et al.*, 1998) para a calibração automática multiobjetivo do modelo IPH II considerando duas funções-objetivo. O algoritmo MOCOM-UA é a versão multiobjetivo do algoritmo SCE-UA (Duan *et al.*, 1992). Trata-se de um algoritmo evolutivo com características semelhantes a um algoritmo genético multiobjetivo.

O algoritmo MOCOM-UA foi criado por Yapo *et al.* (1998) como uma combinação da estratégia de busca do método Simplex de Nelder e Mead, com conceitos de ordenamento de Pareto, evolução competitiva e mistura de complexos.

O algoritmo opera com uma população de pontos (cada ponto definido por um conjunto de parâmetros) que evolui em direção a uma aproximação da região de Pareto, através de sucessivas iterações e avaliações das funções-objetivo. Na etapa inicial é gerada, de forma aleatória, uma população de pontos espalhados entre os limites máximos e mínimos definidos para cada parâmetro. Cada um desses pontos é avaliado com as funções-objetivo e assim estabelecido um ranking multiobjetivo com base no critério de dominância e não dominância. Soluções com ranking igual a um representam soluções não dominadas encontradas até essa iteração. O ranking aumenta conforme mais longe da região de Pareto se encontra a solução.

Essa população ordenada pelo ranking multiobjetivo é separada em conjuntos (chamados de complexos e que incluem soluções com baixo valor no ranking (boas soluções) e com altos valores no ranking (soluções ruins)) que evoluem baseados em um processo de “reprodução”.

O algoritmo MOCOM-UA possui um único parâmetro que deve ser definido pelo usuário: o número de indivíduos da população. Quanto maior a população, maiores são as chances de encontrar uma boa aproximação da região de Pareto, porém maior é o tempo de processamento e o número de iterações necessárias para a convergência do algoritmo. Maiores informações acerca do algoritmo SCE-UA podem ser encontradas em Yapo *et al.* (1998) e Collischonn e Tucci (2003).

A seguir é apresentado um processo de calibração automática multiobjetivo utilizando o programa WIN_IPH2. O exercício de aplicação considera os mesmos dados utilizados no exemplo de calibração manual. Numa primeira etapa foram selecionadas as FO1 e FO6 (Tabela 1) sendo obtidos os resultados apresentados na Figura 9.

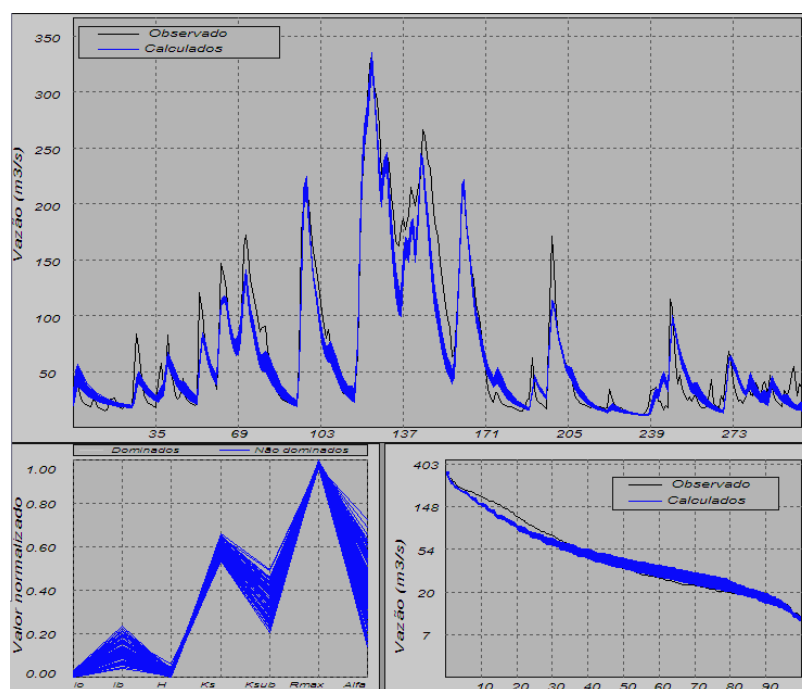


Figura 9. Resultados da calibração automática multiobjetivo do modelo IPH II considerando as FO1 e FO5.

Na parte superior da Figura 9 pode observar-se o hidrograma das vazões calculadas (na cor azul) com base nos valores dos parâmetros do modelo IPH II definidos por indivíduos que geraram a aproximação da região de Pareto. O hidrograma na cor preta representa as vazões observadas. Embaixo à direita observa-se a curva de permanência das vazões calculadas (na cor azul e com base nos resultados anteriores) e observadas (na cor preta). Os hidrogramas calculados e as curvas de permanência calculadas dessa forma definem assim uma faixa de incerteza dos resultados com relação aos valores dos parâmetros.

Por fim, embaixo à esquerda se apresenta ainda um gráfico de valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II definidos por aqueles indivíduos que geraram soluções na aproximação da região de Pareto. Cada um desses conjuntos de parâmetros definiu um hidrograma e uma curva de permanência, representados na cor azul nos gráficos anteriormente apresentados.

5. CONCLUSÕES

Os modelos hidrológicos chuva-vazão possuem parâmetros que devem ser calibrados com base nas informações hidrológicas existentes na bacia. A apresentação visual dos resultados obtidos durante o processo de calibração é de grande utilidade durante essa etapa da modelagem hidrológica. Pode-se ainda destacar sua importância para fins didáticos, permitindo ao aluno compreender com maior facilidade os diversos conceitos envolvidos no processo de calibração de modelos chuva-vazão. Tendo em vista as vantagens da representação visual de resultados foi desenvolvido o programa WIN_IPH2 sendo avaliado seu desempenho em diferentes situações práticas nesse trabalho. O programa WIN_IPH2 mostrou um bom desempenho nos diferentes testes realizados. O programa se encontra disponível para *download* no seguinte *link*: http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/ClimaRH/software/WIN_IPH2/WIN_IPH2.htm. O código fonte e o programa ainda podem ser obtidos a partir dos autores no seguinte *email*: jumarbra@yahoo.com.ar.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à Universidade Nacional do Nordeste (UNNE, Argentina) pelo financiamento de seus estudos de mestrado onde foi iniciada essa pesquisa e ao CNPQ pela bolsa de doutorado concedida.

BIBLIOGRAFIA

- ABDULLA, F. A.; LETTENMAIER, D. P.; LIANG, X. (1999). "Estimation of the ARNO model baseflow parameters using daily streamflow data". Journal of Hydrology 222, pp. 37-54.
- ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.; MICHEL, C.; USART-SANCHEZ, I.; LAVABRE, J. (2001) "Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models". Journal of Hydrology 206, pp. 206-223.

- BEVEN, K. J. (2006). "A manifesto for the equifinality thesis". *Journal of Hydrology* 320, pp. 18-36.
- BEVEN, K.; BINLEY, A. (1992). "The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction". *Hydrological Processes* 6, pp. 279-298.
- BOYLE, D.P.; GUPTA, H.V.; SOROOSHIAN, S. (2000). "Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods." *Water Resources Research* 36(12), pp. 3663-3674.
- BRAVO, J.M.; ALASSIA, D.G.P.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C.E.M. (2006a). *Manual de usuário do WIN_IPH2. Versão 1.0*. Editora: Rutinéia Tassi, Porto Alegre, 62 pp.
- BRAVO, J.M.; ALASSIA, D.G.P.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C.E.M. (2006b). *Manual de conceitos do WIN_IPH2. Versão 1.0*. Editora: Rutinéia Tassi, Porto Alegre, 27 pp.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.G.P. (2006). "Até que ponto devemos confiar em modelos matemáticos? Uma visão da hidrologia superficial". Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas (ABAS), mesa redonda, 23 pp.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2001). "Calibração automática global do modelo IPH2" in Anais do XIV simpósio brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju SE, nov. 2001, 1 CD.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2003). "Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico". *Revista Brasileira dos Recursos Hídricos* 8(3), pp 27-41.
- DINIZ, L. S. (1999). *Calibragem de modelos hidrológicos*. In: *Sistemas Inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Org. por Galvão, C.O. e Valença, M.J.S., ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre – RS, pp. 151-164.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. (1992). "Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models". *Water Resources Research* 28(4), pp. 1015-1031.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. (1994). "Optimal use of the SCE – UA global optimization method for calibrating watershed models". *Journal of Hydrology* 158, pp. 265-284.
- FLETCHER, S.G.; PONNAMBALAM, K. (1998). "A constrained state formulation for the stochastic control of multireservoir systems". *Water Resources Research* 34(2), pp. 257-270.
- GAN, T. Y.; BIFTU, G. F. (1996). "Automatic calibration of conceptual rainfall – runoff models: optimization algorithms, catchment conditions and model structure". *Water Resources Research* 32(12), pp. 3513-3524.
- GUPTA, H.V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P.O. (1998). "Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information". *Water Resources Research*. 34(4), pp. 751-763.
- MADSEN, H. (2000). "Automatic calibration of a conceptual rainfall – runoff model using multiple objectives". *Journal of Hydrology* 235, pp. 276-288.
- MAYS, L.W.; TUNG, Y-K. (1992). *Hydrosystems engineering and management*. McGraw-Hill Inc., New York, 1992, 530 pp.
- MECHING, C. S. *Reliability Estimation*. In: SINGH, V. J. (editor) *Computer models of watershed hydrology*. [S.l.]. Water Resources Publications, Highlands Ranch, 1995. chapter 3.
- MINE, M.R.M. (1998). *Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias*. 146 pp. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

- PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. (2001). "Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments". *Journal of Hydrology* 242, pp. 275-301.
- SOROOSHIAN, S.; DUAN, Q.; GUPTA, V. (1993). "Calibration of rainfall – runoff models: Application of global optimization to the Sacramento soil moisture accounting model". *Water Resources Research* 29(4), pp. 1185-1194.
- SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. (1995). Model calibration. In: SINGH, V. J. (editor) *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, chapter 2.
- TASSI, R.; BRAVO, J.M.; MELLER, A.; COLLISCHONN, W. (2006) "Avaliação del impacto de diferentes funções-objetivo na calibração automática multiobjetivo do modelo IPH II". XXII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Guayana, Venezuela, out. 2006, 1 CD.
- THYER, M.; KUCZERA, G.; BATES, B. C. (1999). "Probabilistic optimization for conceptual rainfall – runoff models: A comparison of the shuffled complex evolution and simulated annealing algorithms". *Water Resources Research* 35(3), pp. 767-773.
- TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos hidrológicos*. ABRH Editora da UFRGS. Porto Alegre. 669 pp.
- TUCCI, C.E.M.; ZAMANILLO, E.A.; PASINATO, H.D. (1989). *Sistema de Simulação Precipitação-Vazão IPHS1*. UFRGS-IPH. Porto Alegre. 66 pp.
- VIEGAS, J.S.; ALLASIA, D.G.P.; TASSI, R.; VILLANUEVA, A.O.N.; TUCCI, C.E.M.; DAMÉ, R.C. (2005). *Manual do usuário do IPHS1. Versão 2.11*. 42 pp. Disponível em: <http://www.iph.ufrgs.br/iphsl>.
- VILLANUEVA, A. O. N.; ALLASIA, D. G.; NEVES, M.; TASSI, R.; BERNHARDT, S. (2005). *Manual de Fundamentos do IPHS1. Versão 2.11*. 42 pp. Disponível em: <http://www.iph.ufrgs.br/iphsl>.
- VRUGT, J.A., GUPTA, H.V., BASTIDAS, L.A., BOUTEN, W., SOROOSHIAN, S. (2003). "Effective and Efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models". *Water Resources Research*, 39(8), 1214.
- WAGENER, T.; WHEATER, H.; GUPTA, H. V. *Rainfall-Runoff modeling in gauged and ungauged catchments*. Imperial College Press. 306 p.
- YAPO, P.O.; GUPTA, H.V.; SOROOSHIAN, S. (1998). "Multiobjective global optimization for hydrologic models". *Journal of Hydrology* 204, pp. 83-97.