

## MODELOS HIDROLÓGICOS SAC-SMA E IPH II: CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO NA ESTIMATIVA DE VAZÕES NA BACIA DO RIO PIRACICABA (MG)<sup>4</sup>

EDUARDO MORGAN ULIANA<sup>1</sup>; DEMETRIUS DAVID DA SILVA<sup>2</sup>; MICHEL CASTRO MOREIRA<sup>2</sup>; SILVIO BUENO PEREIRA<sup>2</sup> E DONIZETE DOS REIS PEREIRA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso, Avenida Alexandre Ferronato, 1200, Setor Industrial, CEP. 78557-267, Sinop, Mato Grosso, Brasil, [morganuliana@gmail.com](mailto:morganuliana@gmail.com)

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Campus Universitário, CEP. 36570-900, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, [demetrius.ufv@gmail.com](mailto:demetrius.ufv@gmail.com), [michelcm@gmail.com](mailto:michelcm@gmail.com)

<sup>3</sup>Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Viçosa, Rodovia LMG 818, km 06, CEP. 35690-000, Florestal, Minas Gerais, Brasil, [donizete.pereira@ufv.br](mailto:donizete.pereira@ufv.br)

<sup>4</sup> O artigo é referente ao capítulo 1 da tese de doutorado do primeiro autor.

### 1 RESUMO

O objetivo do trabalho foi avaliar o desempenho dos modelos conceituais chuva-vazão Soil Moisture Accounting (SAC-SMA) e IPH II para a estimativa das vazões diárias na bacia hidrográfica do rio Piracicaba (MG), de modo que os mesmos possam ser utilizados para subsidiar o planejamento e a gestão de recursos hídricos na bacia. O estudo foi realizado em três seções de monitoramento de vazão da bacia do rio Piracicaba, localizada no estado de Minas Gerais - Brasil. A calibração dos modelos foi realizada com o algoritmo SCE-UA, utilizando como função objetivo o índice de Nash-Sutcliffe. Os valores do índice de eficiência de Nash-Sutcliffe obtidos nas três seções de monitoramento foram de 0,87, 0,78 e 0,71 para o modelo SAC-SMA e de 0,88, 0,80, e 0,73 para o modelo IPH II, confirmando que os modelos são “adequados e bons” para a estimativa das vazões diárias. Concluiu-se, portanto, que os modelos SAC-SMA e IPH II são adequados para a estimativa das vazões diárias de cursos de água da bacia do rio Piracicaba (MG), demonstrando potencial para serem utilizados em estudos relacionados com simulação hidrológica e gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas de regiões tropicais.

**Palavras-chave:** modelo concentrado, chuva-vazão, planejamento de recursos hídricos, previsão.

ULIANA, E. M.; SILVA, D. D.; MOREIRA, M. C.; PEREIRA, S. B.; PEREIRA, D. R.  
SAC-SMA AND IPH II HYDROLOGICAL MODELS: CALIBRATION AND  
PERFORMANCE ASSESSMENT FOR WATER FLOW ESTIMATE IN PIRACICABA  
RIVER BASIN (MG)

### 2 ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the performance of conceptual models Sacramento - Soil Moisture Accounting (SAC-SMA) and IPH II for daily flow estimation in Piracicaba river basin, Minas Gerais, so that they may be used in the planning and management of water

resources in the river basin. The study was carried out in three runoff-monitoring sections on Piracicaba river basin, located in the State of Minas Gerais - Brazil. Model calibration was performed through the Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) algorithm, whose objective function was the Nash-Sutcliffe efficiency index. The Nash-Sutcliffe efficiency index values obtained in the three monitoring-sections were 0.87, 0.78, and 0.71 for the SAC-SMA model, and 0.88, 0.80, and 0.73 for the IPH II one. These values confirm that the models are “appropriate and good” for daily flow estimations. Overall, both models can be further used for hydrologic simulations and water resources management in tropical river basins.

**Keywords:** concentrated models, rainfall-runoff, planning of water resources, forecast.

### 3 INTRODUÇÃO

Os modelos conceituais chuva-vazão permitem representar o comportamento dos fenômenos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica e, assim, estimar as vazões dos cursos de água. O conhecimento das vazões é informação primordial para o planejamento e o desenvolvimento de projetos relacionados a recursos hídricos, como: geração de energia elétrica, prevenção contra eventos hidrológicos extremos, manejo de sistemas de irrigação e de abastecimento de água (TUCCI, 2005; TUCCI; CLARKE; COLLISCHONN, 2003; VIOLA et al., 2009).

Além disso, de posse de projeções climáticas, a simulação hidrológica permite quantificar as disponibilidades hídricas em diferentes cenários, minimizando o impacto das incertezas do clima sobre o gerenciamento dos recursos hídricos, como exposto por Huang; Kadir; Chung (2012), Koutroulis et al. (2013), Nóbrega et al. (2011) e Vaze et al. (2010).

Os modelos hidrológicos conceituais chuva-vazão requerem para a sua utilização que sejam calibrados e validados, de acordo com as características da área de estudo.

A calibração consiste de um processo de causa e efeito, onde o sistema tenta abstrair dos dados de entrada as informações necessárias para avaliar quais valores dos parâmetros farão o modelo reproduzir adequadamente o sistema natural. Já a validação permite confirmar a acurácia do

modelo visando à simulação de processos estacionários na bacia hidrográfica (ANDRADE; MELLO; BESKOW, 2013; ARABI; GOVINDARAJU; HANTUSH, 2006; MAGALHÃES, 1989).

Existe um grande número de modelos hidrológicos, com características únicas e aplicações específicas (DEVI; GANASRI; DWARAKISH, 2015). Dentre esses modelos, foram avaliados neste trabalho o IPH II e o SAC-SMA, os quais foram escolhidos por requererem essencialmente, como dados de entrada, a precipitação média e a evapotranspiração, passíveis de serem obtidas para a maior parte das bacias hidrográficas brasileiras. Além disso, os seguintes fatores contribuíram para a escolha dos modelos: não apresentam limitações quanto às características das bacias (área, vegetação, geologia, características do canal de drenagem, dentre outras); apresentam grande potencial de uso em bacias hidrográficas brasileiras; e ainda foram pouco explorados no Brasil, principalmente o SAC-SMA.

O modelo IPH II (TUCCI, 2005) foi desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com o objetivo de ser utilizado para projetos de engenharia em bacias hidrográficas. É um modelo simples, com poucos parâmetros, e pode ser utilizado em bacias com diferentes características (MINE e TUCCI, 1999). O modelo foi utilizado por Brun e Tucci (2001) e Mine e Tucci (1999) para previsão, em tempo real,

do volume afluente a reservatórios de hidrelétricas e os autores concluíram que o modelo estima esses volumes com acurácia.

Em estudo realizado na bacia do rio Pomba, Pereira et al. (2016c) verificaram que o modelo IPH II possui potencial para ser utilizado em estudos relacionados com simulação hidrológica e gestão de recursos hídricos na bacia, como na caracterização de vazões de outorga para projetos de irrigação.

O modelo Sacramento - Soil Moisture Accounting (SAC-SMA) (BURNASH, 1995), considerado complexo, foi desenvolvido nos Estados Unidos para previsão de cheias no rio Sacramento (Califórnia). O SAC-SMA é amplamente utilizado pelo Serviço Meteorológico Nacional dos Estados Unidos (NWS-NOAA) e em diversos outros países, permitindo a estimativa de vazões com acurácia (ANDREWS; CROKE; JAKEMAN, 2011; BOUGHTON, 2005).

A fim de quantificar as vazões de cursos de água a partir de dados de precipitação de 15 bacias hidrográficas da Ilha de Creta, Grécia, Koutroulis et al. (2013) utilizaram o SAC-SMA e concluíram que o modelo possui desempenho adequado para simular as vazões de cursos de água.

No Brasil, o modelo SAC-SMA foi utilizado por Breda; Gonçalves; Silveira (2011) para estimativa de vazões horárias na bacia hidrográfica do rio Iguaçu, sendo comprovado que o modelo pode ser utilizado para essa função.

Com base no exposto, o objetivo do estudo foi verificar o desempenho dos modelos hidrológicos IPH II e SAC-SMA (Sacramento) para a estimativa das vazões diárias da bacia hidrográfica do rio Piracicaba (MG), de modo que possam ser utilizados para subsidiar o planejamento e a gestão de recursos hídricos da bacia.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

A área de estudo foi a bacia do rio Piracicaba, localizada na porção centro-leste do estado de Minas Gerais (Figura 1). Segundo o PIRH-Doce (2010), a economia dessa bacia é baseada principalmente em três atividades de grande porte: mineração, siderurgia e monocultura de eucalipto.

Os modelos IPH II e SAC-SMA requerem como variáveis de entrada dados de precipitação e evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ). Com vistas à calibração automática e verificação do desempenho desses modelos hidrológicos para a estimativa de vazões diárias na bacia do rio Piracicaba, foram utilizados dados de estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológica pertencentes à Agência Nacional de Águas (ANA) e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas na bacia hidrográfica e no seu entorno (Figura 1 e Tabela 1).

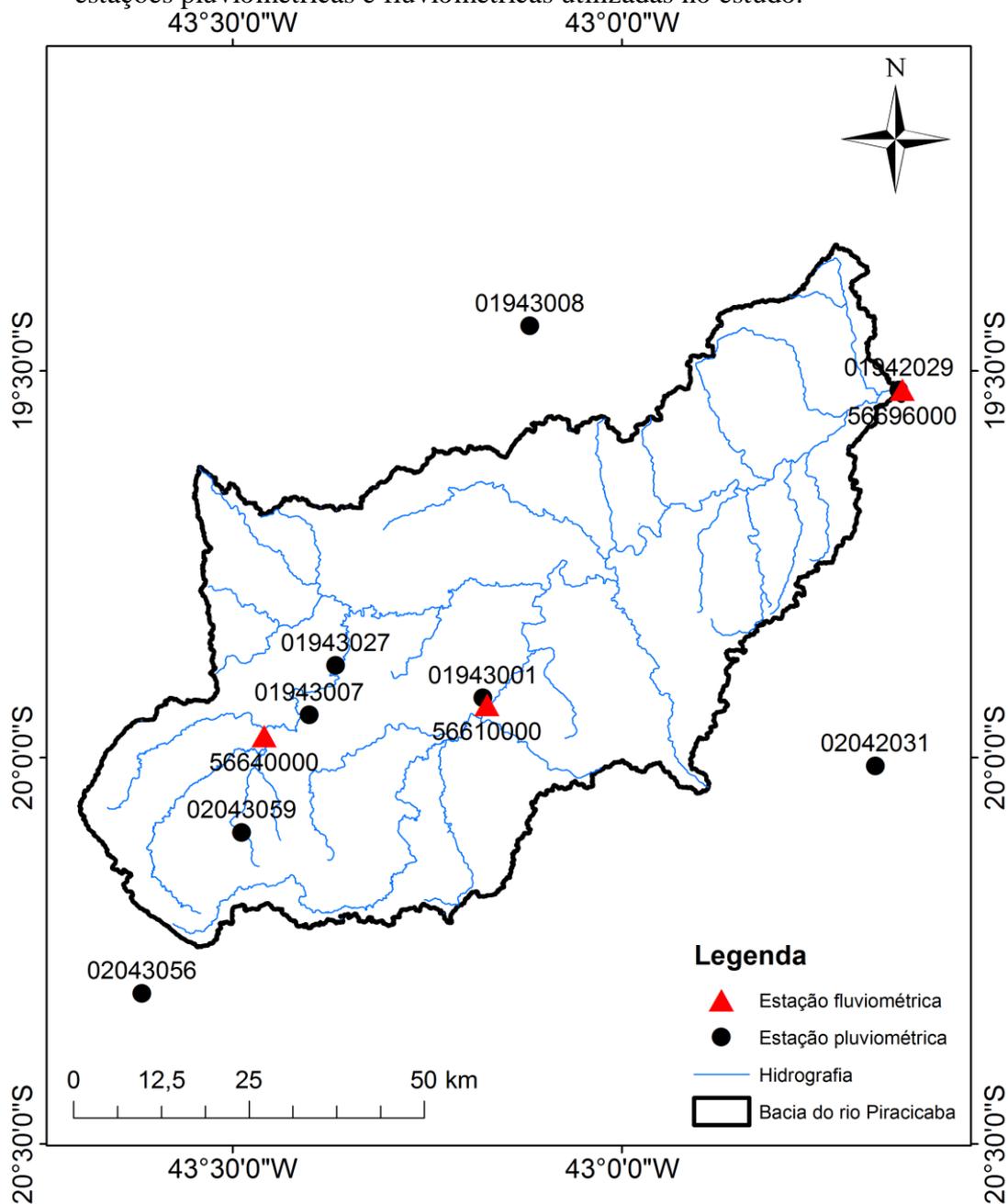
Foram utilizados dados diários de vazões correspondentes aos períodos de: 01/09/1990 a 31/12/1992, 01/07/2002 a 31/12/2006 e 01/09/1990 a 31/12/1993, registrados nas estações fluviométricas Carrapato (56640000), Rio Piracicaba (56610000) e Mário de Carvalho (56696000), respectivamente (Tabela 1). Esses períodos foram selecionados por não apresentarem falhas nos dados hidrometeorológicos das estações listadas, de forma a evitar o uso de estimativas obtidas com base em métodos de preenchimento de falhas, os quais já possuem erros associados a eles.

Neste estudo, 70% dos dados da série histórica foram utilizados para calibração e 30% para validação.

A precipitação média de cada sub-bacia e a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) foram determinadas pelos métodos de Thiessen e Hargreaves e Samani, respectivamente. Detalhes desses métodos

podem ser obtidos nos trabalhos de Pereira; Sedyama; Villa Nova (2013) e Macêdo et al. (2013).

**Figura 1.** Bacia hidrográfica do rio Piracicaba (MG), com destaque para a localização das estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas no estudo.



**Tabela 1.** Informações sobre as estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológica utilizadas no estudo

Código	Nome	Estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	AD (km <sup>2</sup> )
01942029	Mário de Carvalho	P	-19,525	-42,644	232	-
01943008	Santa Maria do Itabira	P	-19,442	-43,118	538	-
01943027	Usina Peti	P	-19,881	-43,367	1.110	-
02042031	Fazenda Cach. D'Antas	P	-20,011	-42,674	280	-
02043059	Colégio Caraça	P	-20,097	-43,488	1.300	-
02043056	Fazenda Água Limpa	P	-20,305	-43,616	965	-
01943007	Santa Bárbara	P	-19,945	-43,401	748	-
01943001	Rio Piracicaba	P	-19,923	-43,178	623	-
56640000	Carrapato	F	-19,972	-43,459	755	427,5
56610000	Rio Piracicaba	F	-19,932	-43,173	748	1.164,2
56696000	Mário de Carvalho	F	-19,524	-42,640	232	5.304,0
2042024	Viçosa	M	-20,766	-42,866	712	-

AD: área de drenagem; P: estação pluviométrica; F: estação fluviométrica; M: estação meteorológica.

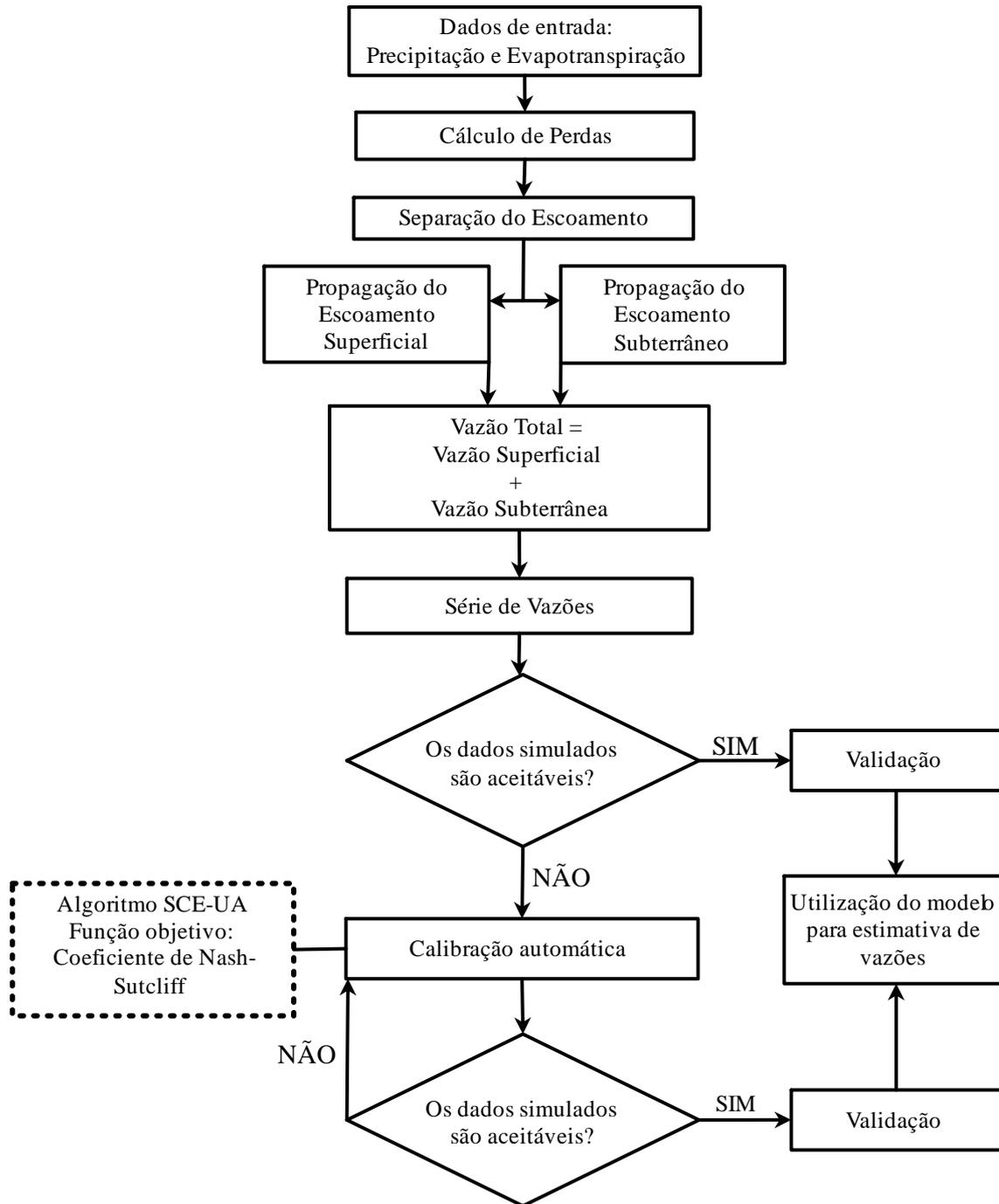
#### 4.2 Modelo hidrológico IPH II

A calibração automática do modelo IPH II e as estimativas das vazões foram realizadas utilizando-se o *software* WIN-IPH2, desenvolvido por Bravo et al. (2006).

Para calibração automática do modelo hidrológico IPH II, foi utilizado o algoritmo Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) desenvolvido por Duan; Sorooshian; Gupta (1992). A função objetivo escolhida para calibração foi o coeficiente de Nash-Sutcliffe, conforme descrito por Pereira et al. (2014a).

A estimativa da vazão diária com o modelo IPH II, nas três seções de controle da bacia do rio Piracicaba, foi realizada com a execução dos seguintes algoritmos: quantificação das perdas por evaporação e interceptação; separação dos escoamentos; propagação do escoamento superficial; propagação do escoamento subterrâneo. Na Figura 2 é apresentada uma representação esquemática das principais atividades executadas para estimar as vazões diárias com o modelo IPH II. Descrições detalhadas desses algoritmos podem ser obtidas em Tucci (2005).

**Figura 2.** Representação esquemática com as principais atividades executadas para a estimativa das vazões utilizando o modelo IPH II

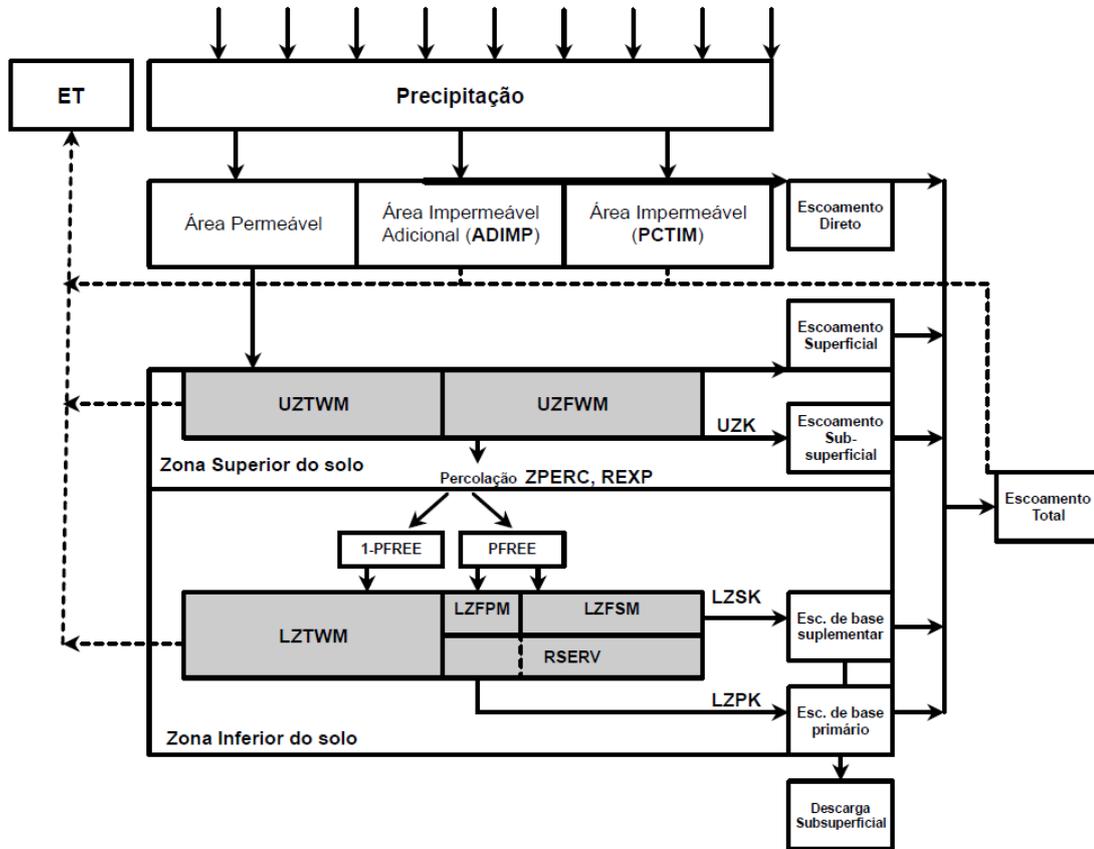


**4.3 Modelo hidrológico SAC-SMA (Sacramento)**

Na Figura 3, está a representação esquemática do modelo SAC-SMA.

Descrições detalhadas desse modelo, conforme os conceitos hidrológicos, podem ser obtidas em Burnash e Ferral (1996).

**Figura 3.** Representação esquemática do modelo SAC-SMA, explicitando os parâmetros otimizáveis



Fonte: Adaptado de Van Werkhoven et al. (2009).

A calibração automática do modelo SAC-SMA e as simulações foram realizadas com auxílio de um algoritmo, implementado em linguagem de programação R, denominado Hydromad (ANDREWS; CROKE; JAKEMAN, 2011).

Para calibração automática do modelo foi utilizado o algoritmo Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) e a função objetivo escolhida foi o coeficiente de Nash-Sutcliffe, assim como no caso do modelo IPH II.

#### 4.4 Avaliação do desempenho dos modelos hidrológicos

A fim de se verificar o desempenho dos modelos IPH II e SAC-SMA na estimativa das vazões da bacia do rio Piracicaba, os resultados obtidos pelos modelos foram comparados com os dados

observados nas três seções de monitoramento utilizando-se: o erro absoluto médio (MAE); a raiz do erro quadrático médio (RMSE); o viés; o teste t pareado ao nível de 5% de significância; o índice de concordância de Willmott; o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe ( $E_{NS}$ ).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad (01)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \quad (02)$$

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i) \quad (03)$$

$$t = \sqrt{\frac{(n-1) viés^2}{RMSE^2 - viés^2}} \quad (04)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_i| + |O_i - O_i|)^2} \right] \quad (05)$$

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (06)$$

Em que  $P_i$  é a vazão estimada ( $m^3 s^{-1}$ );  $O_i$ , a vazão observada ( $m^3 s^{-1}$ );  $O$ , a média das vazões observadas ( $m^3 s^{-1}$ );  $n$ , o número de valores da amostra.

O erro absoluto médio (MAE) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) medem a magnitude dos erros em um conjunto de estimativas, nas unidades da variável de interesse. Valores de MAE e RMSE iguais a zero indicam ajuste perfeito do modelo à série de dados observados (MORIASI et al., 2007).

O MAE e o RMSE foram analisados ao mesmo tempo com a finalidade de diagnosticar a variação dos erros nas séries de vazões estimadas. O valor de RMSE será sempre superior ou igual ao MAE. Quanto maior a diferença entre eles, maior também a variância dos erros individuais na amostra. No entanto, se apresentarem valores iguais, isso significa que todos os erros possuem a mesma ordem de grandeza.

O viés foi utilizado para verificar a existência de subestimativa (valor positivo) ou superestimativa (valor negativo) pelo modelo.

O teste t pareado no nível  $\alpha$  de 5% de significância foi empregado com a finalidade de confirmar se a diferença ( $\Delta$ ) entre os dados observados e simulados foi estatisticamente nula, condição esperada.

As hipóteses do teste t foram:  $H_0: \Delta = 0$ ;  $H_1: \Delta \neq 0$ . Quando o valor em módulo de t (Equação 4) apresentou valor superior ao quantil da distribuição t, de Student, com  $v = n-1$  graus de liberdade ( $t_{\frac{\alpha}{2}, v}$ ), então, rejeitou-se a hipótese nula ( $H_0$ ) bilateral, ou seja, de que existe diferença entre os valores de vazões observadas e

simuladas pelo modelo, o que não é desejável.

O valor de “d” varia entre 0 e 1, e valores próximos à unidade indicam concordância, ou seja, melhor o desempenho do modelo na predição.

Para avaliar o desempenho dos modelos com relação ao índice de eficiência de Nash-Sutcliffe ( $E_{NS}$ ), foi adotada a classificação sugerida por Van Liew et al. (2007). De acordo com a classificação:  $E_{NS} = 1$  significa ajuste perfeito dos dados preditos pelo modelo;  $E_{NS} > 0,75$  indica que o modelo é adequado e bom;  $0,36 < E_{NS} < 0,75$  indica que o modelo é considerado satisfatório;  $E_{NS} < 0,36$  indica que o modelo não é satisfatório.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Modelo IPH II

Na calibração automática do modelo IPH II foram obtidos coeficientes de Nash e Sutcliffe ( $E_{ns}$ ) iguais a 0,74, 0,80 e 0,89 para as seções de monitoramento Carrapato (56640000), Rio Piracicaba (56610000) e Mário de Carvalho (56696000), respectivamente. Na Tabela 2 estão apresentados os parâmetros do modelo hidrológico IPH II obtidos por calibração automática utilizando-se o algoritmo SCE-UA.

De acordo com a classificação do  $E_{NS}$ , a calibração do modelo IPH II foi “adequada e boa”, para estimativa das vazões diárias na bacia do rio Piracicaba nas seções de controle Mário de Carvalho e Rio Piracicaba e, “satisfatória” na seção Carrapato, corroborando os resultados obtidos por Pereira et al. (2016c) e Silva et al. (2009).

**Tabela 2.** Parâmetros do modelo IPH-II obtidos com a calibração automática.

Parâmetro	Estação fluviométrica		
	Carrapato	Rio Piracicaba	Mário de Carvalho
$I_0$ (mm d <sup>-1</sup> )	227,35	128,39	60,86
$I_b$ (mm d <sup>-1</sup> )	16,26	2,37	6,72
h	0,233	0,62	0,2465
$K_s$ (d)	1,168	2,41	4,48
$K_{sub}$ (d)	211,567	63,50	163,52
$R_{máx}$ (mm)	15,00	0,024	0,0004
<i>alfa</i>	0,01	0,20	0,017

$I_0$  é a capacidade de infiltração inicial do solo;  $I_b$  é a capacidade de infiltração quando o solo está saturado;  $h = e^{-k}$ , em que  $k$  é um parâmetro empírico relacionado ao tipo de solo;  $K_s$  é o tempo médio de esvaziamento do reservatório superficial;  $K_{sub}$  é o tempo médio de esvaziamento do reservatório subterrâneo;  $R_{máx}$  é a lâmina máxima de precipitação que pode ser retida pelo reservatório de interceptação (cobertura vegetal e depressões do solo); *alfa* é um parâmetro do modelo, relacionado a um coeficiente que representa a porcentagem de precipitação que escoou superficialmente.

Os hietogramas e hidrogramas das vazões observadas e estimadas pelo modelo IPH II para as seções Carrapato, Rio Piracicaba e Mário de Carvalho podem ser visualizados na Figura 4. Por meio de uma avaliação visual dessas figuras percebe-se, de maneira geral, uma boa concordância entre os valores de vazões estimados pelo modelo IPH II e aqueles observados, porém verifica-se que o modelo apresentou certa dificuldade em simular alguns valores de vazões de pico.

Na Figura 5, estão apresentadas as curvas de permanência das vazões diárias observadas e simuladas pelo modelo IPH II para as três seções de monitoramento da bacia do rio Piracicaba.

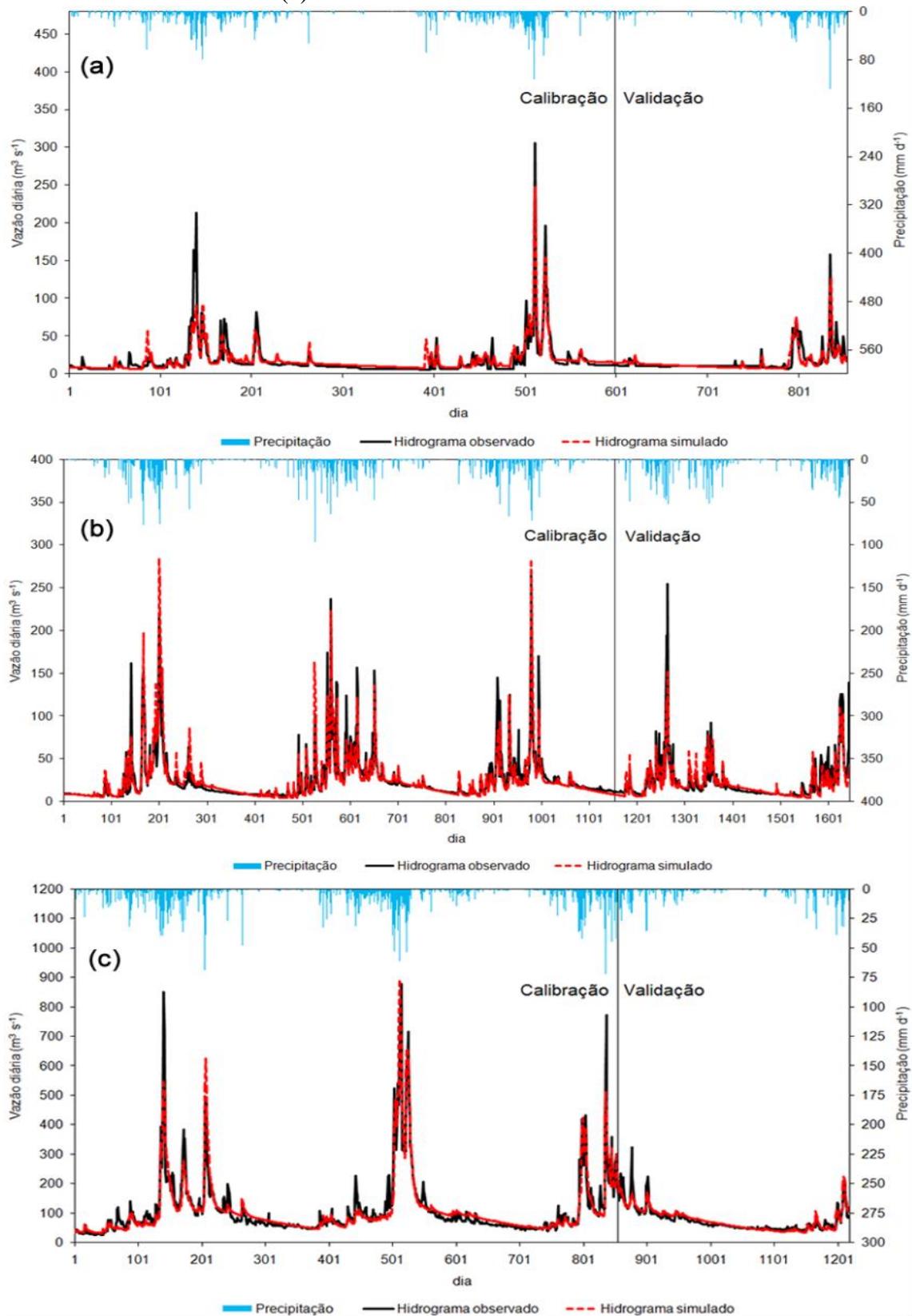
Observa-se na Figura 5, de forma geral, que o modelo estimou adequadamente

as vazões, no entanto, apresentou exatidão menor para simular vazões com baixa permanência, principalmente nas seções de controle Carrapato e Mário de Carvalho (Figura 5).

As vazões com permanência de 90 e 95% ( $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ), extraídas das curvas apresentadas na Figura 5, permitem caracterizar a disponibilidade hídrica natural de um curso de água e podem ser consideradas como um dos limitantes para concessão de outorga de direito de uso dos recursos hídricos.

Na curva observada para a seção de controle Carrapato (Figura 5a), os valores de  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  foram de 6,5 e 6,3 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, enquanto que na curva simulada esses valores foram de 7,9 e 7,4, respectivamente. Nota-se que o modelo apresentou desempenho adequado.

**Figura 4.** Hietogramas e hidrogramas das vazões diárias observadas e estimadas pelo modelo hidrológico IPH II para as seções de medição Carrapato (a), Rio Piracicaba (b) e Mário de Carvalho (c)



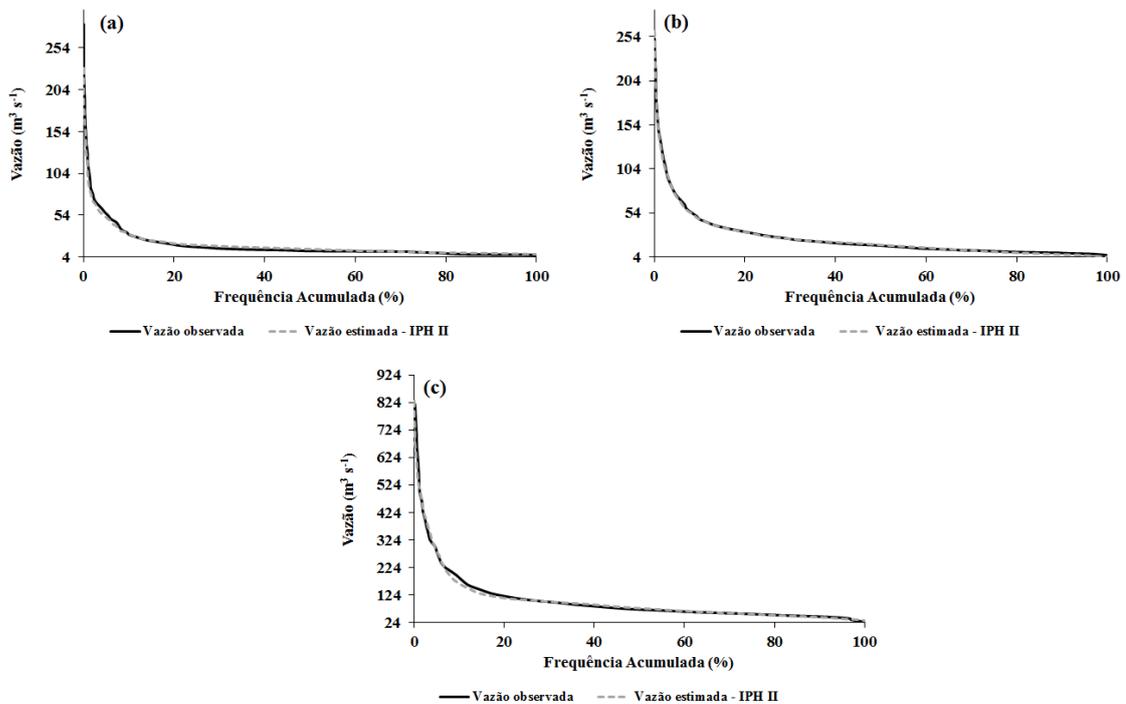
Para a seção de monitoramento Rio Piracicaba (Figura 5b), os valores de  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  observados foram de 8,4 e 7,5  $m^3 s^{-1}$ , enquanto que na curva simulada esses valores foram de 7,0 e 6,1, respectivamente. Diferentemente do que aconteceu na seção de controle Carrapato, o modelo subestimou essas vazões em 17 e 19 % e demonstra adequabilidade para estimativa dessas variáveis.

Por fim, para a seção de controle Mário de Carvalho (Figura 5c), os valores de  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  observados foram de 45,5 e 41,3

$m^3 s^{-1}$ , enquanto que na curva simulada esses valores foram de 43,9 e 38,2, respectivamente. Nessa seção, o modelo subestimou as vazões  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  em 3,5 e 7,5%, respectivamente, apresentando desempenho melhor para estimativa dessas variáveis, comparativamente às seções anteriores.

Esses resultados confirmam que o modelo chuva-vazão IPH II possui potencial para ser utilizado em simulação de vazões para fins de gestão de recursos hídricos na bacia do rio Piracicaba.

**Figura 5.** Curvas de permanência das vazões diárias observadas e estimadas pelo modelo IPH II para as seções de controle Carrapato (a), Rio Piracicaba (b) e Mário de Carvalho (c).



Na Tabela 3 estão apresentadas as medidas quantitativas do desempenho do modelo IPH II. De acordo com a classificação do índice de eficiência de Nash-Sutcliffe ( $E_{NS}$ ), é possível afirmar que o modelo IPH II foi “adequado e bom” para a estimativa das vazões diárias nas seções de controle Mário de Carvalho e Rio Piracicaba, e “satisfatório” na seção Carrapato (Tabela 3).

Os valores do índice de concordância de Willmott apresentaram valores próximos a 1, indicando boa concordância entre os valores observados e estimados nas três seções de monitoramento.

Com relação ao teste t pareado ao nível de 5% de significância, percebe-se que o modelo IPH II apresentou valor de t não significativo nas três seções de controle, ou seja, pode-se afirmar com 95% de

probabilidade que a diferença entre os valores observados e estimados pelo modelo é estatisticamente nula (Tabela 3).

**Tabela 3.** Medidas quantitativas do desempenho do modelo IPH II

Indicador	Estação fluviométrica		
	Carrapato	Rio Piracicaba	Mário de Carvalho
$\bar{O}$	17,4	24,9	102,2
$\bar{P}$	18,0	25,0	101,8
MAE	5,8	6,0	17,1
RMSE	11,6	12,0	33,5
Viés	-0,58	-0,08	0,48
d	0,92	0,95	0,97
$E_{NS}$	0,73	0,80	0,88
t	1,48 <sup>(ns)</sup>	0,29 <sup>(ns)</sup>	0,50 <sup>(ns)</sup>

$\bar{O}$  e  $\bar{P}$  são as vazões médias ( $m^3 s^{-1}$ ) observada e estimada, respectivamente; MAE é o erro absoluto médio ( $m^3 s^{-1}$ ); RMSE é a raiz do erro quadrático médio ( $m^3 s^{-1}$ ); d é o índice de concordância de Willmott;  $E_{NS}$  é o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe; t é o valor da estatística de teste do teste t pareado; (ns) não significativo ao nível de 5% de significância.

O valor do viés indicou subestimativa das vazões pelo modelo IPH II na localidade de Mário de Carvalho e superestimativa nas localidades Rio Piracicaba e Carrapato (Tabela 3).

Por fim, a proximidade entre o MAE e o RMSE indicou que a variância dos erros individuais foi pequena em ambas as estimativas, ou seja, a maior parte dos erros do modelo são relativamente pequenos.

Deve-se destacar que as estimativas das vazões para a seção de controle Carrapato apresentaram erros maiores em relação às estações Mário de Carvalho e Rio Piracicaba, mas de forma geral, com base na análise quantitativa dos resíduos apresentada na Tabela 3, é possível afirmar que o modelo IPH II apresentou precisão e acurácia para a estimativa das vazões diárias e pode ser utilizado em estudos relacionados ao planejamento e gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Piracicaba.

Ressalta-se, ainda, que nenhum modelo hidrológico pode fornecer resultado perfeito ao ser aplicado em nível de bacia hidrográfica, pois a ciência ainda não atingiu um conhecimento completo sobre os processos físicos do ciclo hidrológico (MAGALHÃES, 1989). Exemplo disso são

os resultados obtidos com o modelo IPH II para a bacia do rio Piracicaba que, apesar de apresentarem erros, estão em um nível aceitável e não comprometeram a confiabilidade das estimativas.

As causas dos erros na estimativa das vazões da bacia do rio Piracicaba podem estar relacionadas a um conjunto de fatores, dentre os quais: erros na coleta de dados hidrometeorológicos, transformação de dados pontuais em médias espaciais, erros na estrutura do modelo devido a simplificações de processos físicos do ciclo hidrológico e, por fim, erros relacionados à função objetivo utilizada na calibração.

Pela análise dos valores apresentados na Tabela 5, verifica-se que o modelo IPH II teve melhor desempenho para estimar as vazões na seção Mário de Carvalho, com área de drenagem de 5304,0 km<sup>2</sup>, seguida da estação Rio Piracicaba, com área de 1164,2 km<sup>2</sup> e, por fim, na seção de monitoramento Carrapato, com área de drenagem de 427,5 km<sup>2</sup>. Deste modo, percebe-se que o modelo apresentou melhor desempenho para as maiores áreas de drenagem.

Segundo Benaman; Shoemaker; Haith (2005), Beskow et al. (2011) e Viola et al. (2009), quando os modelos chuva-

vazão são executados em escala de tempo diária ou mensal, principalmente em pequenas e médias bacias hidrográficas tropicais, torna-se mais difícil obter resultados com boa exatidão, devido à alta variabilidade espacial e temporal da precipitação, bem como ao rápido deslocamento do escoamento superficial.

A dificuldade para simulação de alguns valores de vazões de pico, como observado nas Figuras 6 a 8, foi a mesma de diversos estudos relacionados à transformação de chuva em vazão, como os trabalhos de Andrade; Mello; Beskow (2013) e Pereira et al. (2014, a,b). Segundo Mello et al. (2008), uma das hipóteses para a menor exatidão na estimativa dessas vazões pode estar relacionada ao conjunto de configurações e dados de entrada fornecidos ao modelo hidrológico, bem como à alta variabilidade espacial e temporal dos componentes hidrológicos, o que dificulta a definição de valores representativos para toda a área de drenagem.

O erro de estimativa das vazões da bacia do rio Piracicaba, pelo modelo IPH II, pode ter sido resultante também da transformação da precipitação pontual em média espacial com o método de Thiessen. O erro decorrente dessa transformação torna-se ainda maior quando ocorrem chuvas convectivas na bacia, caracterizadas por cobrirem pequenas áreas e terem alta intensidade e curta duração.

Moreira; Mine; Pereira Filho (2007) utilizaram a precipitação média, determinada a partir de pluviômetros, e a precipitação estimada com radar meteorológico como dado de entrada de um modelo chuva-vazão. Esses autores concluíram que os dados oriundos do radar proporcionaram melhores estimativas das vazões quando as chuvas foram provocadas por áreas de instabilidade, tendo como principais características alta intensidade e distribuição espacial muito irregular. O contrário foi observado em situações em que

as chuvas foram provocadas por sistemas frontais.

Os resultados da calibração e validação do modelo IPH II para a bacia do rio Piracicaba demonstram que ele é uma ferramenta promissora para ser utilizada na elaboração de cenários de planejamento e gestão de recursos hídricos na bacia, previsão e mitigação de eventos extremos de vazões bem como para análise de consistência e preenchimento de falhas de dados de vazões.

## 5.2 Modelo SAC-SMA

Na Tabela 4, estão apresentados os parâmetros do modelo hidrológico SAC-SMA obtidos por calibração automática com o algoritmo SCE-UA.

Na calibração automática do modelo SAC-SMA foram obtidos coeficientes de Nash e Sutcliffe ( $E_{ns}$ ) iguais a 0,71, 0,78 e 0,86 para as seções de monitoramento Carrapato (56640000), Rio Piracicaba (56610000) e Mário de Carvalho (56696000), respectivamente.

De acordo com a classificação do  $E_{NS}$ , a calibração do modelo SAC-SMA foi “adequada e boa” para a estimativa das vazões diárias nas seções de controle Mário de Carvalho e Rio Piracicaba e “satisfatória” na seção Carrapato, assim como no caso da modelagem com o IPH II.

Os resultados da calibração automática do SAC-SMA, obtidos para a bacia do rio Piracicaba, estão de acordo com os observados por Koutroulis et al. (2013) e Newman et al. (2015).

Os hietogramas e hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelo modelo SAC-SMA podem ser visualizados na Figura 6 para as seções Carrapato, Rio Piracicaba e Mário de Carvalho, respectivamente.

Por meio de uma avaliação visual da Figura 6 percebe-se, de maneira geral, uma boa concordância entre os valores de vazões simulados pelo modelo SAC-SMA e aqueles

observados na bacia do rio Piracicaba. Verifica-se, entretanto, assim como ocorreu com o modelo IPH II, maior dificuldade em simular alguns valores de pico.

Na Figura 7, estão apresentadas as curvas de permanência das vazões diárias observadas e simuladas pelo modelo SAC-

SMA para as três seções de monitoramento da bacia do rio Piracicaba. Observa-se nessa Figura, de forma geral, que o modelo estimou adequadamente as vazões, no entanto, apresentou exatidão menor para simular vazões com baixa permanência.

**Tabela 4.** Parâmetros do modelo SAC-SMA obtidos com calibração automática

Parâmetro	Estação fluviométrica		
	Carrapato	Rio Piracicaba	Mário de Carvalho
UZTWM (mm)	3,43	9,8	37,3
UZFWM (mm)	4,13	26,35	46,3
LZTWM (mm)	131,11	359,70	198,4
LZFPM (mm)	674,43	485,96	805,6
LZFSM (mm)	373,68	612,02	1,0
UZK (dia <sup>-1</sup> )	0,30	0,42	0,17
LZPK (dia <sup>-1</sup> )	0,0040	0,13	0,0029
LZSK (dia <sup>-1</sup> )	0,01	0,11	0,18
PCTIM (km <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> )	0,07	0,036	0,078
ADIMP (km <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> )	0,32	0,4	0,24
PFREE (km <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> )	0,26	0,6	0,58
ZPERC (adim.)	238,92	190,88	226,4
REXP (adim.)	1,65	3,18	0,008

UZTWM: capacidade máxima do armazenamento superior de água de tensão superficial; UZFWM: capacidade máxima do armazenamento superior de água livre; LZTWM: capacidade máxima do armazenamento inferior de água de tensão superficial; LZFPM: capacidade máxima do armazenamento inferior primário de água livre; LZFSM: capacidade máxima do armazenamento inferior suplementar de água livre; UZK: taxa de depleção lateral da zona superior de água livre; LZPK: taxa de depleção do escoamento de base primário; LZSK: taxa de depleção do escoamento de base suplementar; PCTIM: fração de área constantemente impermeável na bacia; ADIMP: área impermeável adicional; PFREE: fração da água percolada da zona superior que vai direto para a zona de água livre inferior; ZPERC: taxa máxima de percolação; REXP: expoente da equação de percolação.

Na curva simulada com o modelo SAC-SMA para a seção de controle Carrapato (Figura 7a), os valores de  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  foram de 5,6 e 5,3 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Verifica-se que o modelo apresentou desempenho adequado visto que subestimou as vazões  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  em 16,0 e 19,0%, respectivamente.

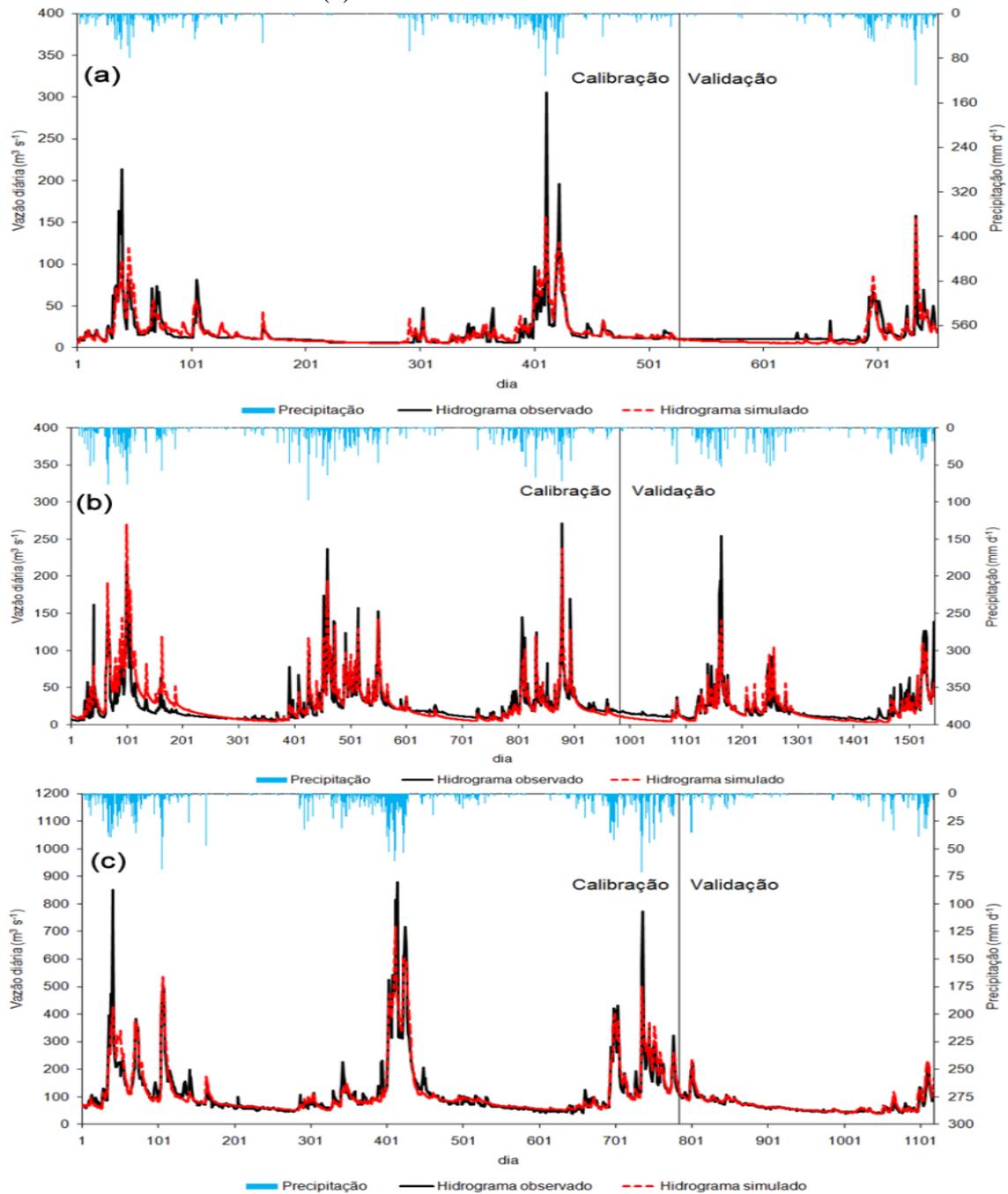
Para a seção de monitoramento Rio Piracicaba (Figura 7b), os valores de  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  simulados foram de 5,8 e 5,1 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, respectivamente. Nessa seção o modelo subestimou essas vazões em 31 e 32%, apresentando desempenho inferior ao IPH II para simulação dessas variáveis.

Por fim, para a seção de controle Mário de Carvalho (Figura 7c), os valores  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  simulados com o SAC-SMA foram de 51,5 e 47,4 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, respectivamente. O modelo superestimou as vazões  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  em 13,0 e 15,0%, respectivamente, apresentando desempenho pior para estimativa dessas variáveis, comparativamente ao IPH II.

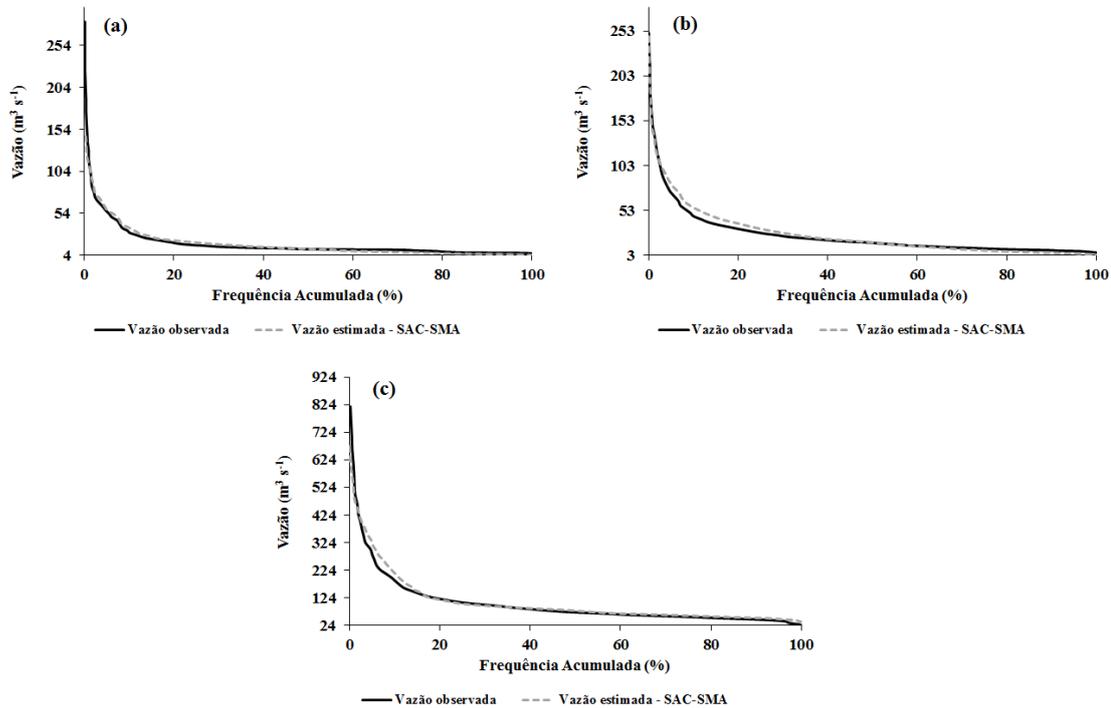
De forma geral, os resultados demonstram que o modelo SAC-SMA é uma ferramenta promissora para a gestão de recursos hídricos na bacia do rio Piracicaba

no que se refere à caracterização das vazões passíveis de serem outorgadas.

**Figura 6.** Hietograma e hidrograma das vazões diárias observadas e estimadas pelo modelo hidrológico SAC-SMA para a seção de medição Carrapato (a), Rio Piracicaba (b) e Mário de Carvalho (c)



**Figura 7.** Curvas de permanência das vazões diárias observadas e estimadas pelo modelo SAC-SMA para as seções de controle Carrapato (a), Rio Piracicaba (b) e Mário de Carvalho (c).



De acordo com a classificação do índice de eficiência de Nash-Sutcliffe ( $E_{NS}$ ), pode-se afirmar que o modelo SAC-SMA foi classificado como “adequado e bom” para

estimativa das vazões diárias nas seções de controle Mário de Carvalho e Rio Piracicaba e “satisfatório” na seção Carrapato (Tabela 5).

**Tabela 5.** Medidas quantitativas do desempenho do modelo SAC-SMA

Indicador	Estação fluviométrica		
	Carrapato	Rio Piracicaba	Mário de Carvalho
$\bar{O}$	18,3	25,9	106,8
$\bar{P}$	18,0	26,3	107,8
MAE	6,0	7,7	16,0
RMSE	12,6	12,8	35,2
Viés	0,32	-0,34	-1,0
d	0,90	0,94	0,96
$E_{NS}$	0,71	0,78	0,87
t	0,69 <sup>(ns)</sup>	1,04 <sup>(ns)</sup>	0,99 <sup>(ns)</sup>

$\bar{O}$  e  $\bar{P}$  são as vazões médias ( $m^3 s^{-1}$ ) observada e estimada, respectivamente; MAE é o erro absoluto médio ( $m^3 s^{-1}$ ); RMSE é a raiz do erro quadrático médio ( $m^3 s^{-1}$ ); d é o índice de concordância de Willmott;  $E_{NS}$  é o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe; t é o valor da estatística de teste do teste t pareado; (ns) não significativo ao nível de 5% de significância.

Os valores do índice de concordância de Willmott apresentaram-se próximos a 1, indicando boa concordância entre os valores

observados e estimados nas três seções de monitoramento.

Com relação ao teste t pareado ao nível de 5% de significância, percebe-se que

o modelo SAC-SMA apresentou valor de  $t$  não significativo, ou seja, pode-se afirmar com 95% de probabilidade que a diferença entre os valores observados e estimados pelo modelo é estatisticamente nula (Tabela 5).

O valor do viés indicou superestimativa das vazões pelo modelo SAC-SMA nas seções de Mário de Carvalho e Rio Piracicaba e subestimativa na seção Carrapato (Tabela 5).

Por fim, a proximidade entre o MAE e o RMSE indicou que a variância dos erros individuais é pequena em ambas as estimativas, ou seja, a maior parte dos erros do modelo são relativamente pequenos.

Deve-se destacar que as estimativas das vazões para as seções de controle Carrapato e Rio Piracicaba apresentaram erros maiores em relação a estação Mário de Carvalho, entretanto, com base na análise do desempenho apresentada na Tabela 5, é possível afirmar que o modelo apresentou precisão e acurácia para estimativa das vazões diárias na bacia do rio Piracicaba.

Verifica-se na Tabela 5 que o desempenho do modelo SAC-SMA reduz à medida que a área de drenagem se torna menor. As causas desse comportamento, e também, para a menor exatidão na estimativa de alguns valores de vazões de pico estão relacionadas a uma série de fatores e a discussão realizada anteriormente para o modelo IPH II é válida também para o modelo SAC-SMA.

Os resultados da calibração e validação do modelo SAC-SMA para a bacia do rio Piracicaba demonstram que ele é uma ferramenta promissora e passível de ser utilizada por usuários e órgãos gestores de recursos hídricos para o gerenciamento desse recurso natural.

### 5.3 Desempenho dos modelos hidrológicos

Ao comparar os resultados das medidas quantitativas do desempenho dos modelos IPH II e SAC-SMA, apresentados nas Tabelas 3 e 5, respectivamente, é

possível constatar que o modelo IPH II apresentou MAE e RMSE menores em comparação ao SAC-SMA. Além disso, o IPH II apresentou valores do índice de concordância de Willmott ( $d$ ) e do índice de eficiência de Nash-Sutcliffe ( $E$ ) superiores aos do SAC-SMA.

Verifica-se, portanto, que com base nos resultados obtidos no trabalho é possível afirmar que o modelo IPH II apresentou desempenho superior ao do SAC-SMA para a estimativa das vazões diárias na bacia do rio Piracicaba, no entanto, a diferença entre os modelos foi pequena.

Ressalta-se, ainda, que o modelo IPH II é menos complexo em comparação ao SAC-SMA, de fácil manipulação computacional e possui um menor número de parâmetros, o que constitui-se numa grande vantagem nas condições brasileiras.

O modelo SAC-SMA requer a utilização de, ao menos, cem dias para sua inicialização, já que após esse período, os erros devido às condições iniciais desaparecem. Ao contrário do SAC-SMA, o modelo IPH II, devido à sua simplicidade, não requer um período de dados para inicialização. Com isso, foi possível estimar as vazões sem que tivesse ocorrido redução do período de simulação, o que pode ter contribuído para o melhor desempenho do IPH II.

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a complexidade de um modelo hidrológico chuva-vazão não é necessariamente sinônimo de melhores estimativas. Apesar de o modelo SAC-SMA ser mais complexo e apresentar um detalhamento maior dos processos hidrológicos, este não conseguiu superar o desempenho do IPH II.

## 6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos conclui-se que:

- A calibração automática com o algoritmo de otimização SCE-UA possibilita a estimativa dos parâmetros dos modelos IPH II e SAC-SMA (Sacramento) de forma eficiente;
- Os modelos IPH II e SAC-SMA apresentam dificuldade para simular alguns valores de vazões de pico na bacia do rio Piracicaba;
- Os modelos hidrológicos IPH II e SAC-SMA apresentam melhor desempenho para estimativa de vazões em bacias hidrográficas com maior área de drenagem;
- Os modelos conceituais IPH II e SAC-SMA são adequados para a simulação das vazões diárias na bacia hidrográfica do rio Piracicaba;
- O modelo IPH II apresenta desempenho ligeiramente superior ao do SAC-SMA para

estimativa das vazões diárias na bacia do rio Piracicaba e, por consequência, maior potencial de ser utilizado em estudos de engenharia de recursos hídricos, principalmente nas condições das bacias hidrográficas brasileiras, devido à sua menor complexidade comparativamente ao SAC-SMA.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio a pesquisa.

## 8 REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.1, p.69-76, 2013.

ANDREWS, F. T.; CROKE, B. F. W.; JAKEMAN, A. J. An open software environment for hydrological model assessment and development. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdam, v. 26, n. 10, p. 1171-1185, 2011.

ARABI, M.; GOVINDARAJU, R. S.; HANTUSH, M. M. A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practices. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 333, n. 1, p. 459-471, 2006.

BENAMAN, J.; SHOEMAKER, C. A.; HAITH, D. A. Calibration and validation of soil and water assessment tool on an agricultural watershed in upstate New York. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 10, n. 5, p. 363-374, 2005.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. **Catena**, Amsterdam, v. 86, n. 3, p. 160-171, 2011.

BOUGHTON, W. Catchment water balance modelling in Australia 1960–2004. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 71, n. 2, p. 91-116, 2005.

BRAVO, J.M.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C.E.M. **WIN-IPH2**: manual de usuário. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS, 2006.

BREDA, A.; GONÇALVES, J. E.; SILVEIRA, R. B. Análise de Alterações em Componentes de um Método de Calibração Automática Mono-Objetivo na Qualidade e Eficiência do Ajuste de Parâmetros do Modelo Sacramento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 89-100, 2011.

BRUN, G. W.; TUCCI, C. E. M. Previsão em Tempo Real do Volume Afluente ao Reservatório de Ernestina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n. 2, p.73-79, 2001.

BURNASH, R. J. C. The NWS River Forecast System: catchment modeling. In: SINGH, V. P. (Ed.). **Computer models of watershed hydrology**. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications, 1995. p. 311-366.

BURNASH, R. J. C.; FERRAL, L. **Conceptualization of the sacramento soil moisture accounting model**. Silver Spring: NOAA, Jul. 1996. Disponível em: [http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/nwsrfs/users\\_manual/part2/\\_pdf/23sacsma.pdf](http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/nwsrfs/users_manual/part2/_pdf/23sacsma.pdf). Acesso em: 20 de janeiro, 2015.

DEVI, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, Amsterdam, v. 4, n. 1, p. 1001-1007, 2015.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**, Malden, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, 1992.

HUANG, G.; KADIR, T.; CHUNG, F. Hydrological response to climate warming: The Upper Feather River Watershed. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 426-427, n. 1, p. 138-150, 2012.

KOUTROULIS, A. G.; TSANIS, I. K.; DALIAKOPOULOS, I. N.; JACOB, D. Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 479, n. 1, p. 146-158, 2013.

MACÊDO, M. N. C.; DIAS, H. C. T.; COELHO, F. M. G.; ARAÚJO, E. A.; SOUZA, M. L. H.; SILVA, E. Precipitação pluviométrica e vazão da bacia hidrográfica do Riozinho do Rôla, Amazônia Ocidental. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 8, n. 1, p. 206-221, 2013.

MAGALHÃES, P. C. Hidrologia Superficial. In: RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G.; VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K.; MAGALHÃES, P. C.; CLEARY, R. W. **Engenharia Hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH e Editora da UFRJ, 1989. p. 199-289.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M.; WEIMAR, F. A. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, Amsterdam, v. 75, n. 3, p. 235-247, 2008.

MINE, M. R. M.; TUCCI, C. E. M. Previsão em Tempo Real de Vazões Afluentes a Reservatórios de Usinas Hidrelétricas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p.73-95, 1999.

MOREIRA, I. A.; MINE, M. R. M.; PEREIRA FILHO, A. J. Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão com Dados de Radar e Pluviômetros. **Ingeniería del Agua**, Valencia, v.14, n.2, p.83-96, 2007.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NEWMAN, A. J.; CLARK, M. P.; SAMPSON, K.; WOOD, A.; HAY, L. E.; BOCK, A.; VIGER, R. J.; BLODGETT D.; BREKKE, L.; ARNOLD, J. R.; HOPSON T.; DUAN, Q. Development of a large-sample watershed-scale hydrometeorological data set for the contiguous USA: data set characteristics and assessment of regional variability in hydrologic model performance. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 19, n. 1, p. 209-223, 2015.

NÓBREGA, M. T.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; PAZ, A. R. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 15, n. 2, p. 585-595, 2011.

PEREIRA, D. R.; MARTINEZ, M. A.; ALMEIDA, A. Q.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; ZONTA, J. H. Hydrological simulation using SWAT model in headwater basin in southeast Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.34, n.4, p.789-799, 2014a.

PEREIRA, D. R.; ALMEIDA, A. Q.; MARTINEZ, M. A.; ROSA, D. R. Q. Impacts of deforestation on water balance components of a watershed on the Brazilian east coast. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, n.4, p.1350-1358, 2014b.

PEREIRA, D. R.; ULIANA, E. M.; MARTINEZ, M. A.; SILVA, D. D. Desempenho de um Modelo Hidrológico Concentrado e de um Semidistribuído na Predição de Vazões Diárias. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 2, p. 398-413, 2016c.

PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. Campinas: Fundag, 2013. 323 p.

PIRH-DOCE: Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce. Belo Horizonte: Consórcio Ecoplan-Lume, 2010. 478 p. Disponível em: <[http://www.cbhdoce.org.br/wpccontent/uploads/2014/10/PIRH\\_Doce\\_Volume\\_I.pdf](http://www.cbhdoce.org.br/wpccontent/uploads/2014/10/PIRH_Doce_Volume_I.pdf)>. Acesso em: 11 ago. 2016.

SILVA, J. B. L.; FERREIRA, P. A.; RAMOS, M. M.; EUCLYDES, H. P.; SOARES, V. P. Modelos de previsão de enchentes em tempo real para o município de Nova Era-MG. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 17, n. 3, p. 190-204, 2009.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS e ABRH, 2005. 678 p.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; COLLISCHONN, W. **Previsão de Vazões com Base na Previsão Climática**. Brasília: ANEEL, 2003.

VAN WERKHOVEN, K.; WAGENER, T.; REED, P.; TANG, Y. Sensitivity-guided reduction of parametric dimensionality for multi-objective calibration of watershed models. **Advances in Water Resources**, Amsterdam, v. 32, n. 8, p. 1154-1169, 2009.

VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: a comparison on USDA-ARS watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

VAZE, J.; POST, D. A.; CHIEW, F. H. S.; PERRAUD, J. M.; VINEY, N. R.; TENG, J. Climate non-stationarity – Validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 394, n. 3–4, p. 447-457, 2010.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; ACERBI JUNIOR, F. W. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 5, p. 581-590, 2009.