

MODELAGEM CHUVA-VAZÃO EM UMA BACIA TROPICAL UTILIZANDO O MODELO IPH II

RAINFALL-RUNOFF MODELING IN A TROPICAL BASIN USING THE IPH II MODEL

Eduardo Morgan Uliana¹, Donizete dos Reis Pereira², Demetrius David da Silva², Frederico Terra de Almeida¹, Adilson Pacheco de Souza¹

¹ Universidade Federal de Mato Grosso (UFMG), Cuiába, MT, Brasil

² Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG, Brasil

Correspondência para: Eduardo Morgan Uliana (morganuliana@ufmt.br)

doi: 10.12957/geouerj.2018.30557

Recebido em: 27 set. 2017 | Aceito em: 20 set. 2018



RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a aplicabilidade do modelo hidrológico IPH II para a estimativa de vazões diárias na bacia hidrográfica do rio Pomba assim como verificar a sua acurácia na simulação de eventos extremos, de forma a obter informações para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, além da previsão e mitigação de eventos de cheia no local. A sub-bacia selecionada para o estudo teve como seção de controle a estação fluviométrica Guarani, a qual drena uma área de 1.650 km², localizada no estado de Minas Gerais. Os dados de precipitação e evapotranspiração de referência, requeridos como dados de entrada no modelo IPH II, foram obtidos pelos métodos de Thiessen e Hargreaves-Samani, respectivamente. A calibração do modelo foi realizada de forma automática utilizando o algoritmo Shuffled Complex Evolution (SCE-UA), que possibilitou a estimativa dos parâmetros do modelo de forma rápida e eficiente. Os resultados obtidos com a utilização do modelo IPH II mostraram que as estimativas das vazões diárias foram adequadas e boas, com base no coeficiente de Nash-Sutcliffe, incluindo as máximas e mínimas diárias anuais e, também, as vazões mínimas de referência para fins de outorga, o que permite concluir que o modelo tem potencial para ser utilizado na gestão de recursos hídricos, na previsão de vazões de cheias e na mitigação de seus efeitos, assim como para análise de consistência e preenchimento de falhas nos dados de vazões.

Palavras-chave: simulação hidrológica, modelo hidrológico, calibração automática.

ABSTRACT

The objective of this study was to calibrate and validate the IPH II model for the estimation of daily streamflows in a sub-basin of the Pomba river and check your accuracy in simulating extreme events, in order to obtain information for planning and management of water resources, in addition to the prediction and mitigation of flood events in basin. The Sub-basin selected had the measuring station of streamflow "Guarani" as control section, which drains an area of 1,650 km², located in the State of Minas Gerais. Precipitation and reference evapotranspiration data, required as entry data on IPH II model, were obtained through Thiessen and Hargreaves-Samani methods, respectively. The calibration of model was performed automatically using the Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) algorithm which made possible the estimation of model parameters quickly and efficiently. The results obtained with the use of the IPH II model showed that the estimates of daily streamflows were appropriate and good, including the maximum and minimum annual daily and also the minimum for grants, which leads to the conclusion that the model has the potential to be used in the management of water resources, in forecast of flood events and mitigation of their effects as well as for consistency analysis and filling in gaps in the data flow.

Keywords: hydrologic simulation, hydrologic model, automatic calibration.

INTRODUÇÃO

A escassez ou ausência de dados fluviométricos em bacias hidrográficas brasileiras tornou-se uma das principais motivações para hidrólogos direcionarem esforços no desenvolvimento e aplicação de modelos de simulação de hidrológica, os quais são utilizados em diferentes estudos relacionados a recursos hídricos, pois permitem compreender o comportamento dos fenômenos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica.

No entanto, o uso de um modelo hidrológico requer a acurácia de suas estimativas, as quais podem ser utilizadas para análise de consistência e preenchimento de falhas nos dados de vazão; para gestão de reservatórios e elaboração do programa de operação das usinas hidroelétricas; para elaboração de cenários de planejamento e gestão dos recursos hídricos pelos órgãos gestores, bem como para previsão e mitigação de eventos extremos (TUCCI, 2005; TUCCI et al., 2003; ANDRADE et al., 2013).

Do ponto de vista agrícola, a simulação hidrológica em bacias hidrográficas representa importante ferramenta para gestão dos recursos hídricos, principalmente para caracterização das vazões de outorga para projetos de irrigação (VIOLA et al., 2009). Essa caracterização permite avaliar de maneira preliminar a disponibilidade hídrica para a agricultura irrigada da região, tomando-se como referência as vazões $Q_{7,10}$ (vazão mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos) Q_{90} ou Q_{95} , por exemplo.

Diversos modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos na forma concentrada, semidistribuída ou distribuída e aplicados na simulação em diversas bacias hidrográficas com as mais variadas finalidades. Os modelos concentrados consideram que as variáveis de entrada e de saída são representativas de toda área estudada; já os modelos distribuídos consideram a variabilidade espacial encontrada nas diversas variáveis do modelo. Dentre os modelos concentrados destaca-se o IPH II (TUCCI, 2005), desenvolvido com objetivo de ser utilizado para projetos de engenharia em bacias hidrográficas. É um modelo simples, com poucos parâmetros, e que pode ser utilizado em bacias com diferentes características (MINE e TUCCI, 1999).

Antes de se aplicar um modelo de predição de uma variável em um determinado local é necessário verificar o seu desempenho e, quando necessário, realizar calibrações a fim de minimizar os erros de estimativa (PEREIRA et al., 2009). A calibração, na maioria das vezes, se torna necessária em razão de alguns parâmetros dos modelos representarem abstrações da realidade e outros de serem de difícil mensuração em nível de bacia hidrográfica. O processo de calibração pode ser manual ou automático, sendo o primeiro baseado em um processo interativo em que o usuário altera os valores dos parâmetros em cada simulação que realiza e o segundo em recursos computacionais (BRAVO et al., 2009). Dentre os algoritmos utilizados para calibração automática destaca-se o Shuffled Complex Evolution (SCE-UA), desenvolvido por Duan et al. (1992), que combina técnicas de busca aleatória, algoritmos genéticos e otimização simplex de Nelder e Mead.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a aplicabilidade modelo hidrológico IPH II para a estimativa de vazões diárias na bacia hidrográfica do rio Pomba assim como verificar a sua acurácia na simulação de eventos extremos, de forma a obter informações para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, além da previsão e mitigação de eventos de cheia no local.

METODOLOGIA

Área de estudo e base de dados hidroclimáticos

A área utilizada para o estudo corresponde a uma sub-bacia do rio Pomba, tendo como seção de controle a estação fluviométrica Guarani (58730001), a qual drena uma área de 1.650 km², localizada no Estado de Minas Gerais (Figura 1). A sub-bacia possui altitudes variando de 407 a 1.290 metros, apresentando um relevo fortemente ondulado. O comprimento e a declividade média do rio principal da sub-bacia são iguais a 121 km e 0,0025 m m⁻¹, respectivamente.

Na Tabela 1, encontram-se as informações das estações fluviométricas, pluviométricas e meteorológica utilizadas no estudo e, na Figura 1, a localização dessas estações.

Com relação a solos, a sub-bacia é composta por Latossolos e Cambissolos. O uso predominante do solo é por pastagem e mata nativa, que cobrem juntos, aproximadamente, 90% da área, sendo os outros 10% distribuídos em agricultura, área urbana e plantio de eucalipto.

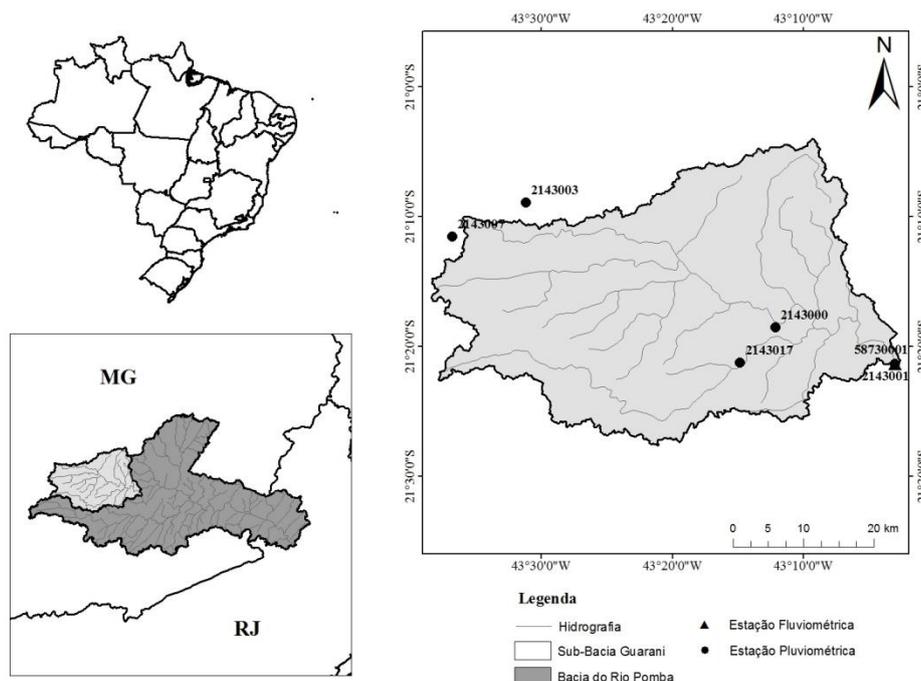


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do rio Pomba e das estações pluviométricas e fluviométrica utilizada no estudo.

Código	Município	Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Instituição
02143003	Desterro do Melo	P	-21,149	-43,520	780	ANA
02143007	Barbacena	P	-21,193	-43,614	1120	ANA
02143017	Tabuleiro	P	-21,355	-43,247	502	ANA
02143000	Rio Pomba	P	-21,309	-43,202	512	ANA
02143001	Guarani	P	-21,356	-43,050	398	ANA
58730001	Guarani	F	-21,356	-43,050	398	ANA
2042024	Viçosa	M	-20,766	-42,866	711,4	INMET

P: estação pluviométrica; F: estação fluviométrica; e M: estação meteorológica

Tabela 2. Estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológica utilizadas no trabalho

Evapotranspiração de referência e precipitação média na bacia

O modelo IPH II requer como variáveis de entrada dados de precipitação e evapotranspiração de referência. A evapotranspiração de referência (ETO) diária foi calculada pelo método de Hargreaves e Samani, conforme Borges Júnior et al. (2012), por meio da Equação 1. Os dados de temperatura máxima e mínima não apresentaram falhas no período em estudo, o que foi determinante para a escolha deste método para estimativa da ETO.

$$ET_0 = 0,0023 R_a (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{0,5} (T_{\text{méd}} + 17,8) \tag{1}$$

em que: ETO é a evapotranspiração de referência (mm dia-1); Ra a radiação extraterrestre, expressa em evaporação equivalente (mm dia-1); T_{máx} a temperatura máxima em °C; T_{mín} é a temperatura mínima em °C; e T_{méd} a temperatura média diária em °C.

A precipitação média na área de drenagem da sub-bacia foi obtida pelo método de Thiessen, como descrito por Uliana et al. (2011). Esse método leva em consideração a geometria do plano de localização das estações pluviométricas para ponderar a influência dos seus dados no cálculo da precipitação média na área de drenagem.

A precipitação média diária pelo método de Thiessen foi obtida com a Equação 2.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_i}{A_t} \quad (2)$$

em que "A" _{"i"} é a área de influência (km²) da estação pluviométrica i com precipitação "P" _{"i"} (mm); "A" _{"t"} é a área total (km²) da bacia.

Modelagem hidrológica com o IPH II

O modelo IPH II (TUCCI, 2005) é composto dos seguintes algoritmos: perdas por meio da evaporação e interceptação; separação de escoamento; propagação do escoamento superficial e propagação do escoamento subterrâneo.

A seguir, descreve-se de forma concisa, os algoritmos que compõem o modelo. Descrições detalhadas dos mesmos podem ser obtidas em Tucci (2005).

No IPH II, a evapotranspiração é deduzida da precipitação, quando for inferior a esta. Caso contrário, a evapotranspiração é atendida pelo reservatório de interceptação (áreas permeáveis e depressões). No caso em que este reservatório esteja totalmente esgotado, o déficit de evapotranspiração passa a ser atendido pela água contida no solo, por meio da relação linear apresentada na Equação 3.

$$E_t = \frac{ET_0 \cdot S_t}{S_{\text{máx}}} \quad (3)$$

em que E_t é a evapotranspiração real no tempo t (mm dia⁻¹), ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); S_t é o teor de água no solo no tempo t (mm); e $S_{\text{máx}}$ é o teor máximo de água no solo (mm).

A separação do escoamento é realizada por meio do algoritmo de Horton modificado, que resulta em duas equações que relacionam o armazenamento com a infiltração e percolação. Essas equações são:

$$S_i = a_i + b_i I_t \quad (4)$$

$$S_t = a_t + b_t T_t \quad (5)$$

onde:

$$a_i = \frac{(-I_0^2)}{[\ln(h)(I_0 - I_b)]} \quad (6)$$

$$b_i = \frac{I_0}{[\ln(h)(I_0 - I_b)]} \quad (7)$$

$$a_t = 0 \quad (8)$$

$$b_t = \frac{(-I_0)}{[\ln(h)I_b]} \quad (9)$$

em que, S_t o teor de água no solo no tempo t (mm); $h = e^{(-Kt)}$, sendo K um parâmetro empírico relacionado ao tipo de solo (dia⁻¹); I_0 é a capacidade de infiltração do solo quando o teor de água é S_0 (mm dia⁻¹); e I_b é a capacidade de infiltração quando o solo está saturado (mm dia⁻¹).

A propagação do volume superficial é feita até a seção principal da bacia com o método de Clark, que consiste de uma combinação do histograma tempo-área (HTA) com um reservatório linear simples (TUCCI, 2005).

O escoamento superficial é definido pelo método do reservatório linear simples, por meio da equação:

$$Q_{S_{t+1}} = Q_{S_t} e^{-\frac{\Delta t}{\Delta K_s}} + V_{S_{t+1}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\Delta K_s}} \right) \quad (10)$$

em que " Q_{S_t} " (" S_t ") é a vazão superficial no instante t (mm dia⁻¹); K_s é o tempo médio de esvaziamento do reservatório superficial (dia) e V_s é a precipitação efetiva no tempo t obtida por meio do HTA (mm).

Por fim, a propagação do escoamento subterrâneo é obtida pelo método do reservatório linear simples, por meio da seguinte equação:

$$Q_{sub_{t+1}} = Q_{sub_t} e^{-\frac{\Delta t}{\Delta K_{sub}}} + V_{P_{t+1}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\Delta K_{sub}}} \right) \quad (11)$$

em que Q_{S_t} é a vazão superficial no instante t (mm dia⁻¹); K_s é o tempo médio de esvaziamento do reservatório superficial (dia) e V_s é a precipitação efetiva no tempo t obtida por meio do HTA (mm).

Calibração e validação do IPH II

A calibração do modelo IPH II e as simulações foram realizadas por meio do software WIN-IPH2, desenvolvido por Bravo et al. (2006). Foram utilizados dados correspondentes ao período de 20/08/1995 a 16/11/1999 para a calibração do modelo. Para validação dos resultados foram utilizados dados do período de 20/08/2001 a 01/01/2003.

Os parâmetros I_0 , I_b , h e K_s , descritos anteriormente, $R_{m\acute{a}x}$ (capacidade do reservatório de interceptação) e α (parâmetro do modelo) foram obtidos por calibração automática mono-objetivo com o algoritmo SCE-UA. Este algoritmo é descrito detalhadamente por Diniz (1999).

A função objetivo (FO) escolhida para calibração foi o coeficiente de Nash e Sutcliffe (NASH e SUTCLIFFE, 1970), calculado pela Equação 12.

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o_i} - Q_{c_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o_i} - \bar{Q})^2} \quad (12)$$

em que: Q_{o_i} é o valor da vazão observada no intervalo de tempo i ; Q_{c_i} é o valor da vazão calculada no intervalo de tempo i ; n é o número de registros; e \bar{Q} é a vazão média da série analisada.

A fim de verificar o desempenho do modelo IPH II na estimativa das vazões da bacia do rio Pomba com base nos dados da estação fluviométrica Guarani (58730001), os resultados obtidos pelo modelo foram comparados com os dados observados na referida seção utilizando: o erro absoluto médio (MAE); a raiz do erro quadrático médio (RMSE); o viés; o teste t pareado a 5% de significância; o índice de concordância de Willmott e o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (E_{NS}) (KRAUSE et al., 2005; PEREIRA et al., 2014; STONE, 1993; WILLMOTT, 1982).

Para fins de avaliação da modelagem com base na eficiência do coeficiente de Nash-Sutcliffe (E_{NS}), adotou-se a classificação sugerida por Motovilov et al. (1999) (VAN LIEW et al., 2007; PEREIRA et al., 2014; PEREIRA et al., 2016a,b). De acordo com esta classificação, valor de $E_{NS} = 1$ significa ajuste perfeito dos dados preditos pelo modelo; $E_{NS} > 0,75$ (modelo é adequado e bom); $0,36 < E_{NS} < 0,75$ o modelo é considerado satisfatório e $E_{NS} < 0,36$ o modelo não é satisfatório.

Uma análise mais detalhada de como o modelo estimou os eventos extremos também foi realizada por meio da análise do erro absoluto médio, a fim de verificar a acurácia do modelo para aplicações práticas, como na estimativa da disponibilidade hídrica da bacia e na previsão de enchentes, de modo a ser útil aos gestores dos recursos hídricos, visando a mitigação de seus efeitos.

Para verificar a acurácia do modelo para simulação de eventos extremos foram determinadas as vazões máximas e mínimas anuais observadas e simuladas pelo IPH II, bem como a curva de permanência das vazões para o período de calibração e validação utilizado nesse estudo.

Para determinação das vazões máximas e mínimas foram selecionados o maior e o menor valor de vazão diária, respectivamente, para cada ano de simulação. Já a curva de permanência foi obtida seguindo procedimento descrito por Uliana et al. (2016).

Resultado e Discussão

Calibração e verificação do desempenho do modelo IPH II

O algoritmo SCE-UA permitiu calibrar o modelo hidrológico IPH II de forma rápida e automática, resultando nos parâmetros apresentados na Tabela 2.

É interessante notar que os valores calibrados para os parâmetros K_{sub} , $R_{máx}$ e Alfa foram exatamente iguais ao limite inferior recomendado por Bravo et al. (2006). Para os outros parâmetros os valores ficaram dentro do intervalo estabelecido. Esse comportamento também foi observado por Bravo et al. (2009) ao calibrar o modelo IPH II utilizando o algoritmo MOCOM-UA, exceto para o parâmetro $R_{máx}$.

Parâmetro	Resultado da Calibração	Limite Recomendado*	
		Inferior	Superior
I_0 (mm d ⁻¹)	234,73	10,00	300,00
I_b (mm d ⁻¹)	2,44	0,10	10,00
h	0,706	0,01	0,999
K_s (d)	2,29	0,01	10,00
K_{sub} (d)	10,00	10,00	500,00
$R_{máx}$ (mm)	0,00	0,00	9,00
Alfa	0,01	0,01	20,00

Tabela 2. Parâmetros do modelo IPH II obtidos na etapa de calibração e limites recomendados

*Bravo et al. (2006); 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); e *alfa* é um parâmetro do modelo, relacionado a um coeficiente que representa a porcentagem de precipitação que escoia superficialmente.

Na Tabela 3 estão apresentadas as medidas quantitativas do desempenho do modelo IPH II nas etapas de calibração e validação.

Observa-se, na Tabela 3, que os valores do erro absoluto médio (MAE) e da raiz do erro quadrático médio (RMSE) foram de 5,2 e 8,6 m³ s⁻¹, na etapa de calibração, e de 6,5 e 10,9 m³ s⁻¹, na de validação, respectivamente. Esses erros podem ser considerados pequenos em se tratando de dados de vazão, que sabidamente apresentam grande variação, devido à grande variabilidade espacial e temporal das precipitações, principalmente quando da ocorrência de chuvas orográficas e convectivas na bacia. Quanto aos resultados de viés, esses indicaram subestimativa das vazões diárias, pelo modelo, tanto nas etapas de calibração quanto de validação.

Etapa	\bar{O}	\bar{P}	MAE	RMSE	Viés	d	E_{NS}	t
Calibração	28,8	28,5	5,2	8,6	0,3	0,95	0,81	1,36 ^(ns)
Validação	31,6	31,5	6,5	10,9	0,1	0,95	0,81	0,30 ^(ns)

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

\bar{O} e \bar{P} são as vazões médias ($m^3 s^{-1}$) observadas e estimadas, 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) é não significativo a 5% de significância.

Os resultados obtidos para os índices de concordância de Willmott (d) e de eficiência de Nash-Sutcliffe (E_{NS}) atestam que modelo IPH II apresentou concordância e é bom para a estimativa das vazões diárias, visto que os mesmos apresentaram valores próximos a 1 e maiores que 0,75, respectivamente (Tabela 3), o que pode ser confirmado pelo teste t pareado a 5% de significância. Percebe-se que o valor de t foi não significativo nas duas etapas analisadas, ou seja, pode-se afirmar com 95% de probabilidade que a diferença entre os valores observados e estimados com o modelo IPH II é estatisticamente nula, indicando que as estimativas são confiáveis. Ao comparar, também, o desempenho do IPH II na calibração e validação, verifica-se que ele não fixou um comportamento específico, visto que o desempenho nas duas etapas foram semelhantes, o que permite generalização para outros eventos.

Estudos recentes sobre a aplicação de modelos hidrológicos em diferentes realidades físicas utilizaram a eficiência de Nash-Sutcliffe (E_{NS}) para avaliar a acurácia da simulação. Viola et al. (2009) desenvolveram e aplicaram um modelo hidrológico na bacia hidrográfica do rio Aiuruoca, estado de Minas Gerais, e obtiveram E_{NS} de 0,87 e 0,92 na calibração e verificação, respectivamente. Collischonn et al. (2007) calibraram e validaram o modelo hidrológico MGB-IPH para a bacia do rio Taquari-Antas, sul do Brasil, e obtiveram E_{NS} entre 0,4 e 0,90 nas etapas de calibração e validação.

Pereira et al. (2016 a,b) calibraram e validaram o modelo hidrológico SWAT para simular as vazões na bacia do rio Pomba com seção de controle em Astolfo Dutra e obtiveram E_{NS} de 0,76 tanto para a calibração quanto a validação. Posteriormente, os autores, avaliaram a acurácia do modelo calibrado para a estimativa das vazões na seção de controle Guarani e obtiveram E_{NS} de 0,62. Em todas essas aplicações os respectivos modelos foram considerados de boa precisão e passíveis de aplicação para simulação hidrológica nas citadas regiões; desta forma se observa que os resultados de E_{NS} (Tabela 3) obtidos com o modelo IPH II na simulação da bacia do rio Pomba com seção de controle em Guarani, foram próximos e em alguns casos até superiores aos E_{NS} obtidos pelos trabalhos citados anteriormente, principalmente, se compararmos aos obtidos por Pereira et al. (2016 a,b) que

aplicaram o SWAT para simulação da vazão diária na mesma bacia. Essas análises reforçam a qualidade do modelo IPH II para a simulação hidrológica da bacia.

Os hidrogramas das vazões observadas e estimadas pelo modelo para as etapas de calibração e validação podem ser visualizados na Figura 2.

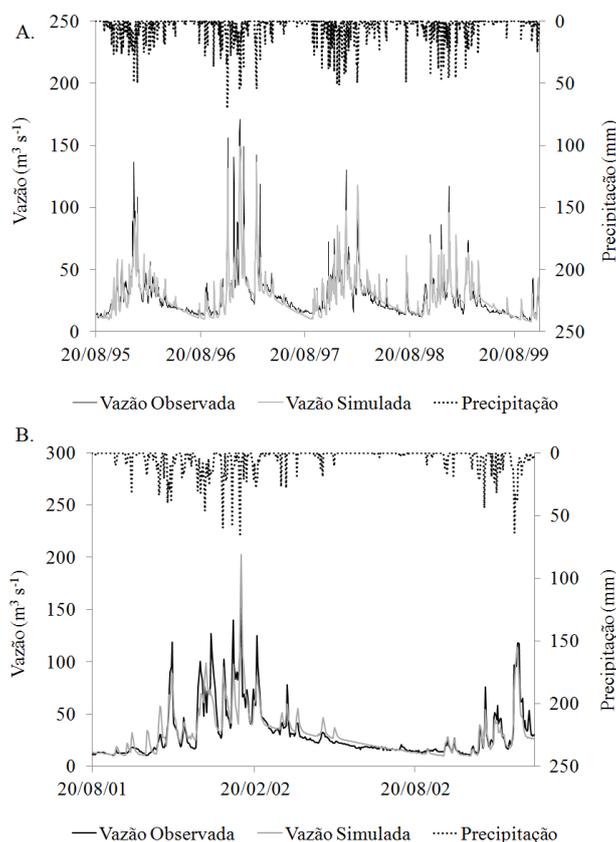


Figura 2. Hidrograma das vazões médias diárias observadas e estimadas pelo modelo hidrológico IPH II na etapa de calibração (a) e validação (b).

Conforme pode ser observado na Figura 2, de um modo geral, as vazões simuladas pelo modelo IPH II ajustaram-se bem às observadas, porém com dificuldades em simular alguns picos de vazão, tanto no período de calibração (Figura 2a) quanto no de validação (Figura 2b). Essa mesma dificuldade foi verificada por outros autores em estudos sobre modelagem hidrológica, tais como von Stackelberg et al. (2007), Viola et al. (2009) e Pereira et al. (2014), sendo justificada pelos referidos autores como relacionada à dificuldade na representação da distribuição espacial e temporal das chuvas e, também, ao passo da modelagem, que muitas vezes é superior ao tempo de concentração das sub-bacias. Isso corrobora com os resultados obtidos e explica a falta de uma estimativa mais precisa das vazões de

pico, pois para a aplicação do modelo IPH II há a transformação da precipitação pontual em média espacializada com o método de Thiessen e, devido a isso, os erros cometidos são maiores, principalmente quando ocorrem chuvas convectivas na bacia, que são caracterizadas por alta variabilidade, por cobrirem pequenas áreas, terem alta intensidade e curta duração.

Análise da simulação de vazões máximas, mínimas e de referência para outorga

A análise mais detalhada de como o modelo hidrológico simulou as vazões máximas, mínimas e mínimas de referência para fins de outorga (Q90 e Q95), em comparação às vazões observadas, é de fundamental importância para avaliar a sua aplicação prática como ferramenta na gestão dos recursos hídricos. Sendo assim, o desempenho do modelo hidrológico IPH II na simulação das vazões máximas e mínimas diárias anuais, além da curva de permanência de valores diários de vazão, usada para fins de estimativa da Q90 e Q95, em comparação aos valores observados na seção de controle Guarani (58730001), é apresentado nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

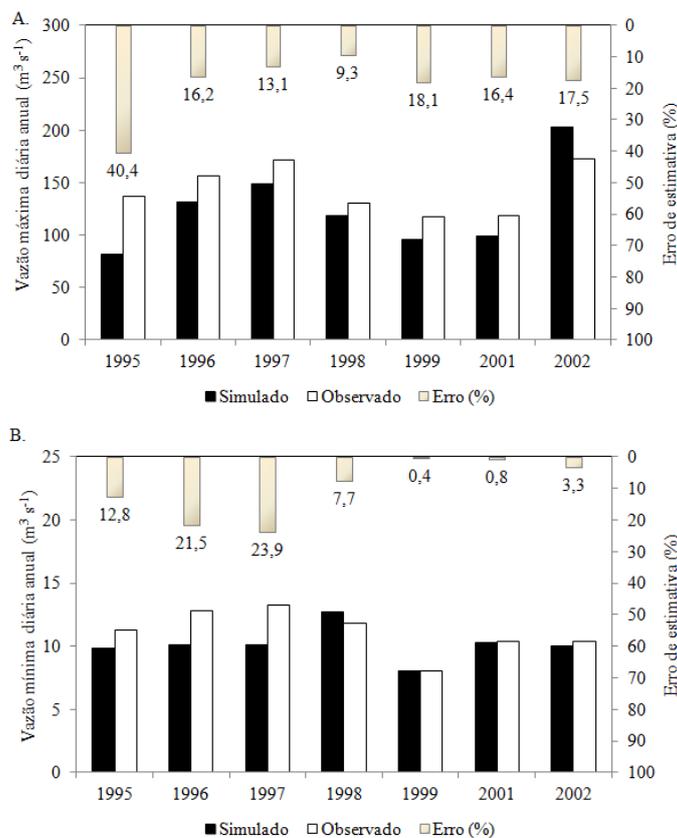


Figura 3. Vazões máximas e mínimas diárias anuais simuladas pelo modelo hidrológico IPH II em comparação com as vazões observadas na seção de controle Guarani (58730001)

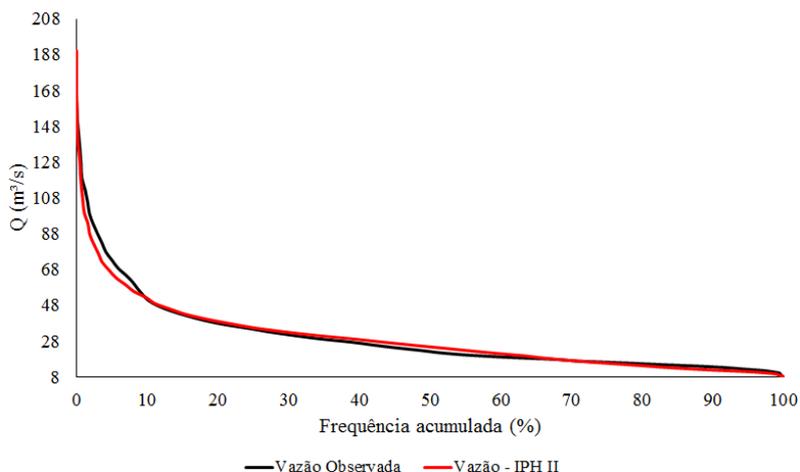


Figura 4. Curvas de permanência das vazões diárias observadas e simuladas pelo modelo IPH II para a seção de controle Guarani (58730001).

Observa-se que os erros cometidos na simulação das vazões máximas diárias anuais (Figura 3a) pelo modelo IPH II, em comparação às vazões observadas, variaram de 9,3 a 40,4%, em valores absolutos, sendo o erro médio de 18,7%. Quanto à simulação dos valores mínimos de vazão diária anual (Figura 3b), os erros variaram de 0,4 a 23,9%, em valores absolutos, sendo a média do erro cometido pelo modelo de 10,1%. É interessante observar, também, que nos últimos anos, os quais correspondem ao período de validação do modelo, os erros cometidos em relação aos valores mínimos de vazão observados foram muito pequenos, evidenciando-se a sua boa capacidade preditiva nas simulações das vazões mínimas diárias anuais.

Os erros cometidos na simulação das vazões máximas estão próximos aos observados na literatura e, em alguns casos, até inferiores. Resultados semelhantes aos encontrados no presente estudo são apresentados por Viola et al. (2009), ao avaliarem o desempenho de um modelo hidrológico para a estimativa das vazões máximas diárias anuais na bacia do rio Aiuruoca, estado de Minas Gerais. Já Pereira et al. (2014) aplicaram e avaliaram o modelo hidrológico SWAT para a estimativa de vazões na bacia hidrográfica do Córrego do Galo, estado do Espírito Santo, verificando erros absolutos na estimativa das vazões máximas diárias anuais próximos de 50%, atribuindo desempenho não adequado ao modelo para estimativa desta variável. Viola et al. (2012) aplicaram o modelo hidrológico LASH à sub-bacia do rio Lontra, no estado do Tocantins, e obtiveram erros de estimativas para as vazões

máximas variando de 9,5 a 23,8%, sendo esses, considerados pelos autores, como pequenos, frente às dificuldades em simular os valores de pico de vazão.

Levando-se em consideração as dificuldades em representar os valores máximos de vazão, conforme justificativas anteriores, e com base nos valores observados na literatura, evidencia-se desempenho satisfatório do modelo IPH II para a estimativa das vazões máximas, podendo o mesmo ser útil no planejamento e gestão de recursos hídricos, particularmente para a previsão de vazões de cheias e minimização dos danos decorrentes dessas, assim como para dimensionamento de infraestruturas de controle de cheias.

Com relação aos erros cometidos pelo modelo IPH II na simulação das vazões mínimas diárias anuais (Figura 3b), eles estão dentro de um intervalo considerado como aceitável em hidrologia. Esse fato é constatado ao comparar os erros cometidos no presente trabalho em relação a outros trabalhos de estimativa de vazões mínimas em bacias hidrográficas, tais como os de Silva et al. (2006), Pereira et al. (2014) e Viola et al. (2012). Pereira et al. (2014), simulando as vazões mínimas diárias anuais como o modelo SWAT para uma bacia de cabeceira, estado do Espírito Santo, encontraram erros variando de 0,2 a 22,8% em valores absolutos, sendo os erros do período de validação bem pequenos, semelhante ao que aconteceu no presente estudo. Viola et al. (2012) obtiveram erro médio de 22,4% na estimativa das vazões mínimas diárias anuais com a aplicação do modelo LASH na bacia do rio Lontra, estado do Tocantins. De acordo com os autores esta magnitude de desvio atesta a aplicabilidade do modelo hidrológico, uma vez que os erros obtidos por modelos empíricos de regionalização hidrológica são frequentemente superiores.

Observa-se na Figura 4 boa aderência entre as curvas de permanência de vazões diárias observadas na seção de controle Guarani (58730001) e simuladas pelo IPH II. Os valores simulados para a Q90 e Q95, extraídos da curva de permanência apresentada na Figura 5, foram de 11,9 e 10,9 m³ s⁻¹, respectivamente, próximos aos observados, que foram de 13,6 e 12,2 m³ s⁻¹, o que resultou em subestimativas de 12,5 (Q90) e 10,7% (Q95).

Assim como para as vazões mínimas diárias anuais, os erros cometidos pelo modelo IPH II na simulação das vazões mínimas de referência extraídos da curva de permanência estão dentro de um intervalo considerado como aceitável em hidrologia, sendo expressivamente inferiores aos obtidos por Viola et al. (2012) e Andrade et al. (2013).

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que o modelo IPH II, calibrado e validado para a bacia do rio Pomba, apresentou estimativas adequadas e boas das vazões diárias, podendo ser utilizado para estimativa das vazões máximas e mínimas diárias anuais assim como das vazões associadas às permanências de 90 e 95% no tempo.

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 Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000100010>
- BORGES JÚNIOR, J. C. F.; ANJOS, R. J.; SILVA, T. J. A.; LIMA, J. R. S.; ANDRADE, C. L. T. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 4, p. 380-390, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000400008>
- BRAVO, J. M.; ALLASIA, D.; TASSI, R.; MELLER, A.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **WIN-IPH2**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas-UFRGS, 2006.
- BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Verificação da Eficiência e Eficácia de um Algoritmo Evolucionário Multi-objetivo na Calibração Automática do Modelo Hidrológico IPH II. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, n. 3, p. 37-50, 2009. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v14n3.p37-50>
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C. da; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, n. 5, p.878-895, 2007. <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>
- DINIZ, L. S. Calibragem de Modelos Hidrológicos. In: GALVÃO, C.O.; VALENÇA, M.J.S. **Sistemas Inteligentes: Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS. p. 151-164, 1999.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, 1992. <http://dx.doi.org/10.1029/91WR02985>
- KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, v. 5, p. 89-97, 2005. <http://dx.doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>

- 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**, v. 4, n. 2, p.73-95, 1999.
<http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v4n2.p73-95>
- MOTOVILOV, Y. G., GOTTSCHALK, L., ENGELAND, K., AND RODHE, A. Validation of distributed hydrological model against spatial observations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 98, p. 257–277, 1999.
[http://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00102-1](http://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00102-1)
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models Part I – A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 2, p. 282-290, 1970. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- 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**, v. 34, n. 4, p. 789-799, 2014.
<http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162014000400018>
- PEREIRA, D. R.; MARTINEZ, M. A.; SILVA, D. D. da; PRUSKI, F. F. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT Model Part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 5, p. 149–163, 2016a. <http://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.008>
- PEREIRA, D. R.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 7, p. 14–37, 2016b. <http://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.05.002>
- PEREIRA, D. R.; YANAGI, S. N. M.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; SILVA, L. A. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, v. 39, n. 9, p. 2488-2493, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782009000900016>
- SILVA, A. M.; OLIVEIRA, P. M.; MELLO, C. R.; PIERANGELI, C. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 374–380, 2006.
<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662006000200019>
- STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, v. 51, n. 4, p. 289-291, 1993. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90124-7](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(93)90124-7)
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2.ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS e ABRH, 2005. 678p.
- TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; COLLISCHONN, W. **Previsão de vazões com base na previsão climática**. Brasília: ANEEL, 2003
- ULIANA, E. M.; MARTINS, C. A. S.; REIS, E. F. Análise Estatística das Vazões e da Precipitação Utilizando Modelos Probabilísticos na Bacia Hidrográfica do Rio São José. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 13, p.1527-1539, 2011.
- ULIANA, E. M.; SOUZA, L. G. S.; SILVA, D. D.; SOUZA, A. P.; ALMEIDA, F. T.; ARAUJO, H. B. Regionalização de vazões para o médio e alto Rio Teles Pires – MT. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 59, n. 4, p. 333-338, 2016.
<http://dx.doi.org/10.4322/rca.2240>
- 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**, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007. <http://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/473>
- 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**, v. 13, n. 5, p. 581-590, 2009.
<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662009000500011>

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; GIONGO, M.; BESKOW, S.; SANTOS, A. F. Modelagem Hidrológica em uma Sub-bacia Hidrográfica do Baixo Rio Araguaia, TO. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3, n. 3, p. 38-47, 2012. <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/JBB/article/view/302>

VON STACKELBERG, N. O., CHESCHEIR, G. M., SKAGGS, R. W., AMATYA, D. M. Simulation of the hydrologic effects of afforestation in the Tacuarembó River Basin, Uruguay. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 2 p. 455–468, 2007. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.22636>

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin - American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)