

DESEMPENHO DE UM MODELO HIDROLÓGICO CONCENTRADO E DE UM SEMIDISTRIBUÍDO NA PREDIÇÃO DE VAZÕES DIÁRIAS

DONIZETE DOS REIS PEREIRA¹; EDUARDO MORGAN ULIANA²; MAURO APARECIDO MARTINEZ³ E DEMETRIUS DAVID DA SILVA⁴

¹Prof. do Instituto de Ciências Agrárias, UFV/Campus de Florestal. Rod. LMG 818, km 6. CEP 35690-000 Florestal (MG), Brasil. e-mail: doniagri@yahoo.com.br

²Prof. do Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, ICAA/UFMT. Avenida Alexandre Ferronato – 1200, Setor Industrial. CEP 78557-267 Sinop (MT), Brasil. e-mail: morganuliana@gmail.com

³Prof. do Departamento de Engenharia Agrícola, DEA/UFV. Av. P.H. Rolfs, s/n. CEP 36570-900 Viçosa (MG), Brasil. e-mail: mmauro@ufv.br

⁴Prof. do Departamento de Engenharia Agrícola, DEA/UFV. Av. P.H. Rolfs, s/n. CEP 36570-900 Viçosa (MG), Brasil. e-mail: demetrius@ufv.br

1 RESUMO

Os modelos hidrológicos são ferramentas importantes que vem sendo utilizadas no planejamento e gestão dos recursos hídricos, motivo pelo qual objetivou-se calibrar, validar e analisar o desempenho dos modelos IPH II e SWAT para a simulação das vazões médias diárias de uma sub-bacia do Rio Pomba, localizada no estado de Minas Gerais. Para a simulação com o modelo IPH II foram utilizados dados de precipitação média na área de drenagem e evapotranspiração de referência. Para a simulação com o SWAT foram utilizados dados espaciais (mapas de solo, uso do solo e relevo) e dados discretos (precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação, umidade relativa, velocidade do vento, vegetação, água subterrânea e características físico-hídricas dos solos). A calibração foi realizada pelo método automático com base no coeficiente de Nash-Sutcliffe. A validação e a verificação do desempenho dos modelos foram realizadas com base no erro médio absoluto, na raiz do erro quadrático médio, no viés, no teste t pareado ao nível de 5% de significância, no índice de concordância de Willmott, além da eficiência de Nash-Sutcliffe. Os modelos IPH II e SWAT apresentaram desempenho bom e satisfatório, respectivamente, para estimar as vazões médias diárias com base no coeficiente de Nash-Sutcliffe, porém, o SWAT apresentou resultados estatisticamente diferentes dos observados no período de validação ao nível de 5% de significância pelo teste t pareado, o que permite concluir que o modelo IPH II é mais confiável e indicado para ser utilizado em estudos relacionados com simulação hidrológica e gestão de recursos hídricos na bacia.

Palavras-chave: simulação hidrológica, calibração automática, SWAT, IPH II.

PEREIRA, D. dos R.; ULIANA, E. M.; MARTINEZ, M. A.; SILVA, D. D. da
PERFORMANCE OF A LUMPED AND A SEMI-DISTRIBUTED HYDROLOGIC
MODEL IN PREDICTING DAILY FLOW RATES

2 ABSTRACT

Hydrological models are important tools which have been used in the planning and management of water resources, reason why the aim of the study was to calibrate, validate and analyze IPH II and SWAT models' performances to simulate the average daily flow rates of a sub-basin of Pomba river, located in Minas Gerais State, Brazil. Rainfall data and reference evapotranspiration were used for the simulation with the IPH II model. On the other hand, for the simulation with SWAT, spatial data were used (soil maps, land use and topography) and discrete data (rainfall, maximum and minimum temperature, radiation, relative humidity, wind speed, vegetation, groundwater and physical-hydric characteristics of soils). Calibration was performed by the automatic method based on Nash-Sutcliffe coefficient. Validation and verification of the models' performance were based on the mean absolute error, root mean squared error, in bias, paired t-test at 5% probability, Willmott concordance and Nash-Sutcliffe efficiency index. The IPH II and SWAT models showed good and satisfactory results in estimating average daily flow rates based on the Nash-Sutcliffe coefficient, respectively, however, the SWAT showed values statistically different from those observed in the validation period at 5% probability by paired t-test, which shows that the IPH II model is more reliable and suitable for use in studies related to hydrologic simulation and management of water resources in the watershed.

Keywords: hydrologic simulation, automatic calibration, SWAT, IPH II.

3 INTRODUÇÃO

Os modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão são utilizados em diferentes estudos relacionados a recursos hídricos, pois possibilitam o melhor entendimento sobre o comportamento dos fenômenos hidrológicos que ocorrem nas bacias hidrográficas. Além disso, são ferramentas importantes para a análise de consistência e preenchimento de falhas de séries históricas de vazão, pois possibilitam fazer a extensão de séries históricas de vazão com base na precipitação, previsão de vazões de projeto para fins de utilização em obras hidráulicas e controle de cheias e previsão de cenários para o planejamento e gestão dos recursos hídricos (TUCCI, 2005; ANDRADE; MELLO; BESKOW, 2013).

Do ponto de vista agrícola, a simulação hidrológica representa uma importante ferramenta no contexto de gestão dos recursos hídricos, caracterizando as vazões de outorga para projetos de irrigação (VIOLA; MELLO; ACERBI JUNIOR, 2009; PEREIRA et al., 2014a). Essa caracterização permite avaliar de maneira preliminar a disponibilidade hídrica para a agricultura irrigada da região, tomando-se como referência as vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} ou Q_{95} , por exemplo.

Diversos modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos na forma concentrada, semidistribuída e distribuída, e aplicados na simulação em diversas bacias hidrográficas com as mais variadas finalidades. Dentre os modelos concentrados destaca-se o modelo IPH II (TUCCI, 2005), desenvolvido com o objetivo de ser utilizado em projetos de engenharia em bacias hidrográficas, sendo um modelo simples, com poucos parâmetros, e pode ser utilizado em bacias com diferentes características (MINE; TUCCI, 1999). Dentre os modelos semidistribuídos destaca-se o SWAT, pela sua ampla aplicação e por permitir uma grande flexibilidade na simulação. O SWAT foi desenvolvido para prever os efeitos de diferentes usos, coberturas e manejos de solos na produção de água e sedimentos e qualidade das águas (ARNOLD et al., 1998).

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 erros de estimativa (PEREIRA et al., 2009). A calibração, na maioria das vezes, se torna necessária em razão de alguns parâmetros do modelo representar abstrações da realidade e outros de serem de difícil mensuração na bacia hidrográfica. Willmott (1982) sugere que a avaliação do desempenho de modelos deve ser feita com base em um conjunto de medidas estatísticas quantitativas para que se tenha uma adequada e apropriada comparação entre variáveis preditas e observadas. Recomenda, ainda, utilizar a raiz do quadrado médio do erro ou o erro médio absoluto, além do erro médio relativo representado pelo índice de concordância entre dados observados e preditos.

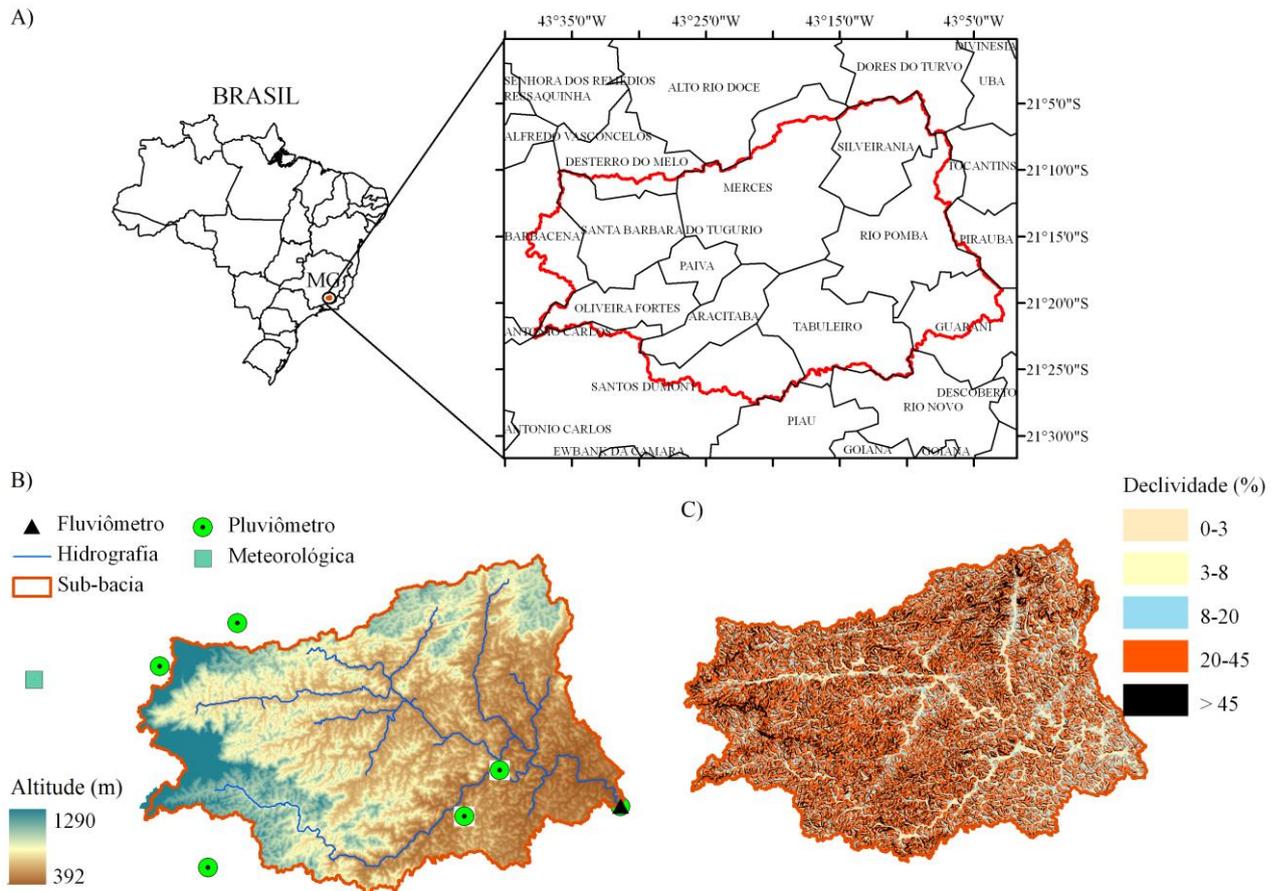
Do exposto, objetivou-se calibrar, validar e analisar o desempenho dos modelos IPH II e SWAT para a simulação das vazões médias diárias de uma sub-bacia do Rio Pomba.

4 MATERIAL E MÉTODOS

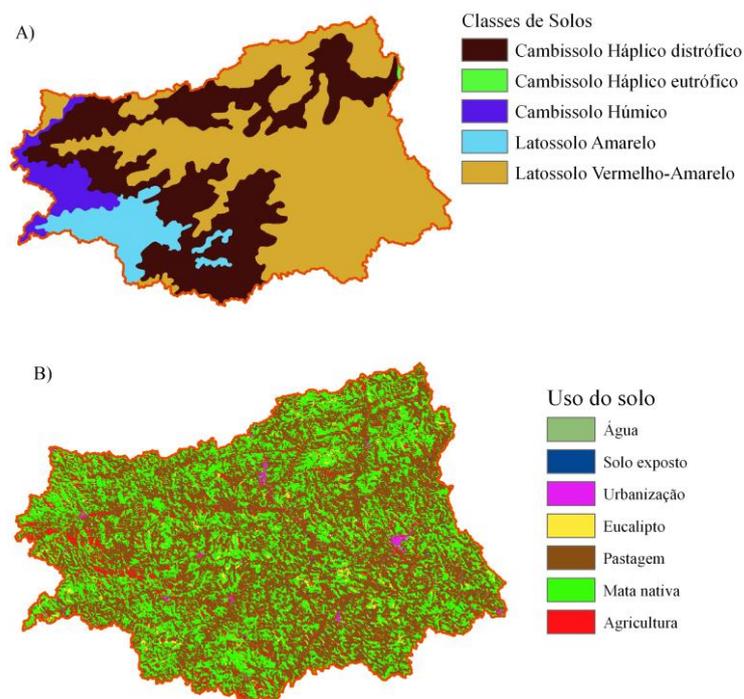
4.1 Área de estudo

O local do estudo corresponde a uma sub-bacia do Rio Pomba, com área de 1.650 km² e perímetro de 315,6 km, localizada no estado de Minas Gerais entre as coordenadas 21°05'00'' e 21°30'00'' S e 43°00'00'' e 43°40'00'' W (Figura 1A). A sub-bacia possui altitudes variando de 392 a 1.290 metros (Figura 1B), apresentando um relevo fortemente ondulado (Figura 1C). O comprimento e a declividade média do rio principal da sub-bacia são iguais a 121 km e 0,0025 m m⁻¹, respectivamente.

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo (A), altitude (B) e declividade (C).



Os solos presentes na sub-bacia são Cambissolos e Latossolos (Figura 2A). O uso do solo da sub-bacia é caracterizado por água, solo exposto, urbanização, eucalipto, pastagem, mata nativa e agricultura (Figura 2B), destacando-se os usos pastagem e mata nativa por cobrirem juntos, aproximadamente, 90 % da área da bacia.

Figura 2. Mapas de Classes de Solos (A) e Uso do Solo (B).

As informações climáticas, pluviométricas e fluviométricas da área de estudo utilizadas no presente trabalho são referentes às estações descritas na Tabela 1 e apresentadas na Figura 1B.

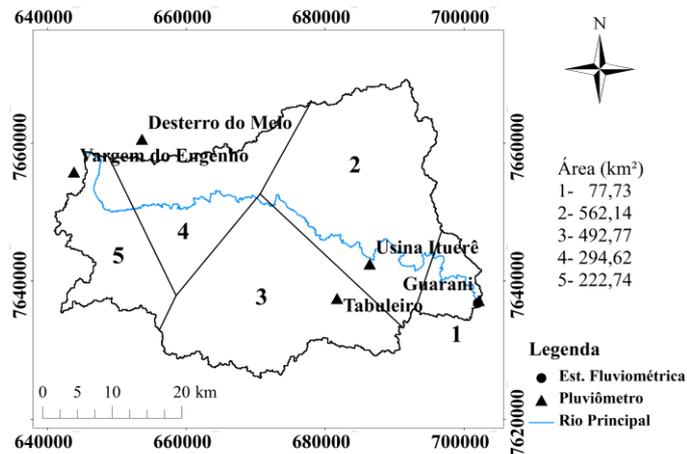
Tabela 1. Estações hidroclimáticas utilizadas no trabalho.

| Código | Nome | Município | Estação | Latitude (graus) | Longitude (graus) | Altitude (m) | Instituição |
|----------|-------------------|------------------|---------------|------------------|-------------------|--------------|-------------|
| 02143003 | Desterro do Melo | Desterro do Melo | Pluviométrica | -21,149 | -43,520 | 780 | ANA |
| 02143007 | Vargem do Engenho | Barbacena | Pluviométrica | -21,193 | -43,614 | 1120 | ANA |
| 02143017 | Tabuleiro | Tabuleiro | Pluviométrica | -21,355 | -43,247 | 502 | ANA |
| 02143000 | Usina Ituerê | Rio Pomba | Pluviométrica | -21,309 | -43,202 | 512 | ANA |
| 02143001 | Guarani | Guarani | Pluviométrica | -21,356 | -43,050 | 398 | ANA |
| 58730001 | Guarani | Guarani | Fluviométrica | -21,356 | -43,050 | 398 | ANA |
| 83689 | Barbacena | Barbacena | Meteorológica | -21,250 | -43,766 | 1.081 | INMET |

4.2 Modelo IPH II

O IPH II (TUCCI, 2005) é um modelo concentrado que requer como variáveis de entrada dados de precipitação e evapotranspiração de referência. A evapotranspiração de referência (ET_0) diária foi calculada pelo método de Hargreaves e Samani, conforme Borges Júnior et al. (2012). A precipitação média na área de drenagem da sub-bacia foi obtida pelo método de Thiessen, conforme Uliana; Martins; Reis (2011), que se baseia na geometria do plano de localização das estações pluviométricas para ponderar a influência dos seus dados no cálculo da precipitação média na área. A área de influência de cada estação pode ser observada na Figura 3.

Figura 3. Estações pluviométricas e suas áreas de influência utilizadas para a obtenção da precipitação média na área de drenagem da bacia usando Thiessen.



O modelo IPH II é composto pelos algoritmos perdas por evaporação e interceptação, separação de escoamento, propagação do escoamento superficial e propagação do escoamento subterrâneo. A seguir descrevem-se, de forma resumida, 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 1.

$$E_t = \frac{ET_0 \cdot S_t}{S_{\text{máx}}} \quad (1)$$

em que E_t é a evapotranspiração real no tempo t (mm d^{-1}), ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); S_t é o conteúdo de água no solo no tempo t (mm); e $S_{\text{máx}}$ é o conteúdo 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. Estas equações são:

$$S_t = a_i + b_i \cdot I_t \quad (2)$$

$$S_t = a_t + b_t \cdot T_t \quad (3)$$

Em que:

$$a_i = \frac{(-I_0^2)}{[\ln(h) \cdot (I_0 - I_b)]} \quad (4)$$

$$b_i = \frac{I_0}{[\ln(h) \cdot (I_0 - I_b)]} \quad (5)$$

$$b_t = \frac{(-I_0)}{[\ln(h) \cdot I_b]} \quad (6)$$

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

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 7:

$$Q_{S(t+1)} = Q_{S(t)} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\Delta K_s}} + V_{S(t+1)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\Delta K_s}} \right) \quad (7)$$

em que $Q_{S(t)}$ é a vazão superficial no instante t ($mm\ d^{-1}$); K_s é o tempo médio de esvaziamento do reservatório superficial (d) e V_s é a precipitação efetiva no tempo t obtida por meio do HTA (mm).

A propagação do escoamento subterrâneo é também obtida pelo método do reservatório linear simples, por meio da equação:

$$Q_{Sub(t+1)} = Q_{Sub(t)} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\Delta K_{sub}}} + V_{p(t+1)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\Delta K_{sub}}} \right) \quad (8)$$

em que: $Q_{Sub(t)}$ é a vazão subterrânea no instante t ($mm\ d^{-1}$); K_{sub} é o tempo médio de esvaziamento do reservatório subterrâneo (d) e V_p é o volume percolado (mm).

Os parâmetros I_0 , I_b , h e K_s , descritos anteriormente, $R_{m\acute{a}x}$ (capacidade do reservatório de interceptação) e *alfa* (parâmetro do modelo) foram obtidos por calibração. Descrição detalhada dos parâmetros pode ser obtida em Bravo et al. (2006).

4.3 Modelo SWAT

O SWAT é um modelo semidistribuído que permite simular diariamente os principais componentes do balanço hídrico da bacia, conforme a equação abaixo.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^n \left(P_i - Q_{sup_i} - Q_{lat_i} - ET_i - Q_{sub_i} \right) \quad (9)$$

em que; SW_t é o conteúdo final de água no solo (mm); SW_0 é o conteúdo inicial de água no solo (mm); P_i é a precipitação (mm); Q_{sup_i} é o escoamento superficial (mm); Q_{lat_i} é o

escoamento lateral (mm); ET_i é a evapotranspiração (mm) e Q_{subi} é o escoamento subterrâneo (mm).

A seguir descrevem-se, de forma resumida, a metodologia de obtenção de cada componente do balanço hídrico. Descrições detalhadas podem ser obtidas em Neitsch et al. (2005a).

O escoamento superficial foi estimado pelo método modificado do Número da Curva (NEITSCH et al., 2005a) e o escoamento lateral pelo método do armazenamento cinemático. Para simular a evapotranspiração o modelo estima, separadamente, a evaporação da água do solo e a transpiração da planta; a evaporação da água do solo é estimada usando funções exponenciais da profundidade e do conteúdo de água; e a transpiração é estimada corrigindo-se a evapotranspiração potencial (PET) para as condições de déficits de pressão de vapor e do conteúdo de água no solo. A evapotranspiração potencial foi estimada pelo método de Penman-Monteith. O escoamento subterrâneo foi estimado separando a contribuição do aquífero raso e do aquífero profundo, sendo a contribuição do aquífero raso considerada no balanço hídrico e a do aquífero profundo considerada como perda do sistema (NEITSCH et al., 2005a).

Os dados de entrada necessários para a simulação com o modelo SWAT constituíram-se de uma base de dados espaciais, referentes aos mapas de tipos de solos, uso dos solos e relevo (Figuras 1 e 2) e de uma base de dados discreta, referentes aos dados de clima, características físico-hídricas do solo, vegetação e água subterrânea. O mapa de solos foi obtido a partir de um levantamento de solos realizado por Schaefer et al. (2010) na escala de 1:500.000 (Figura 2A). Os parâmetros físico-hídricos dos solos foram obtidos do projeto RADAMBRASIL (1983) referentes aos perfis de solos 13, 19, 41, 41 (extra), 44 (extra) e 51. Como valores de entrada para a condutividade hidráulica do solo saturado foram adotados aqueles obtidos em trabalhos de campo por Moraes et al. (2003) e Zonta et al. (2010). Os dados relacionados à água subterrânea e vegetação foram obtidos do próprio banco de dados do modelo, com modificações em alguns parâmetros da vegetação, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros da vegetação modificados da base de dados do SWAT para simulação hidrológica na sub-bacia do Rio Pomba.

| Uso da terra | BLAI ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) | GSI (m s^{-1}) | RDMX (m) | OV_N (s m^{-3}) | Fonte consultada |
|------------------|--|------------------------------|----------------------|-------------------------------|---|
| Vegetação nativa | 7,500 ⁽¹⁾ | 0,017 ⁽³⁾ | 5,000 ⁽¹⁾ | 0,300 ⁽⁴⁾ | ⁽¹⁾ Almeida e Soares (2003) |
| Eucalipto | 4,000 ⁽¹⁾ | 0,010 ⁽¹⁾ | 2,500 ⁽¹⁾ | 0,120 ⁽⁴⁾ | ⁽²⁾ Viola; Mello; Acerbi Junior (2009) |
| Agricultura | 7,000 ⁽²⁾ | 0,014 ⁽⁵⁾ | 1,500 ⁽⁵⁾ | 0,190 ⁽⁴⁾ | ⁽³⁾ Sá; Costa; Roberts (1996) |
| Pastagem | 3,000 ⁽²⁾ | 0,013 ⁽³⁾ | 0,600 ⁽²⁾ | 0,150 ⁽⁴⁾ | ⁽⁴⁾ Neitsch et al. (2005b) |
| | | | | | ⁽⁵⁾ Valor médio |

BLAI – Índice de área foliar máximo; GSI – condutância estomática máxima; RDMX – profundidade máxima de raízes e OV_N – coeficiente de Manning para a superfície do solo.

As informações do relevo (Figura 1B) foram obtidas a partir do Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado (MDEHC), elaborado com base nas imagens ASTER, adquiridas junto a NASA (<http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>), com resolução espacial de 30 m. O mapeamento do uso do solo (Figura 2B) foi realizado a partir de imagens

do sensor ThematicMapper (TM+), a bordo do satélite Landsat 5, do ano de 2010, utilizando o método de classificação supervisionada da máxima verossimilhança. Foram coletadas amostras de treinamento considerando sete classes de uso do solo: pastagem, vegetação nativa, eucalipto, agricultura, solo sem cobertura vegetal, área urbana e corpos hídricos. O índice Kappa, indicador de qualidade da amostragem, foi de 80,5%, classificado como excelente, segundo Congalton e Green (1998). Para avaliação do mapeamento, utilizou-se o mapa de cobertura vegetal do Zoneamento Ecológico e Econômico de Minas Gerais (ZEE MG), realizado em 2009.

Os demais dados de entrada do modelo são hidroclimáticos, como a precipitação pluvial (mm), temperatura máxima e mínima do ar (°C), radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$), velocidade do vento (m s^{-1}), umidade relativa do ar (%) e a vazão do curso d'água ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$). Os dados meteorológicos utilizados como entrada foram provenientes da estação meteorológica localizada em Barbacena, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados de precipitação foram obtidos a partir de séries históricas de precipitação diária de 6 postos pluviométricos disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB) da Agência Nacional de Águas (ANA). Todos os dados hidroclimáticos utilizados se encontravam na escala de tempo diária.

4.4 Calibração, validação e análise de desempenho dos modelos

Foram utilizados dados diários de vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) correspondentes ao período de 20/08/1995 a 16/11/1999 para realização da calibração e estimativa dos parâmetros dos modelos. Para validação dos resultados foram utilizados dados do período de 20/08/2001 a 01/01/2003. A análise de desempenho dos modelos foi realizada tanto para o período de calibração quanto o de validação.

A calibração foi realizada de maneira automática utilizando o algoritmo SCE-UA. A função objetivo escolhida para calibração foi o coeficiente de Nash-Sutcliffe (E_{NS}), conforme descrito em Pereira et al. (2014a):

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

em que: O_i é o valor da vazão observada no intervalo de tempo i ; P_i é o valor da vazão predita no intervalo de tempo i ; n é o número de registros; e \bar{O} é a vazão média da série analisada.

Para avaliar a calibração do modelo foi adotada a classificação sugerida por van Liew et al. (2007). De acordo com a 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.

A calibração do modelo IPH II e as simulações foram realizadas por meio do software WIN-IPH2, desenvolvido por Bravo et al. (2006). Para o SWAT a calibração e as simulações foram feitas por meio da interface entre o ArcGIS e o SWAT denominada de ArcSWAT.

Para validar e verificar o desempenho dos modelos na estimativa das vazões foram utilizadas as seguintes medidas estatísticas (WILLMOTT, 1982; KRAUSE; BOYLE; BÅSE, 2005): erro absoluto médio (MAE); raiz do quadrado médio do erro (RMSE); viés; teste t pareado com 5% de significância; índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (E_{NS}); além do índice de concordância de Willmott descrito pela equação 11:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad (11)$$

em que P_i é a vazão estimada; O_i é a vazão observada; e O é a média das vazões observadas.

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

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 3 e 4 estão apresentados os resultados da calibração automática dos parâmetros dos modelos hidrológicos IPH II e SWAT, respectivamente, utilizando o algoritmo SCE-UA.

Tabela 3. Parâmetros do modelo IPH II obtidos na etapa de calibração e limites recomendados.

| Parâmetro | Resultado da calibração | Limite recomendado* | |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------|----------|
| | | Inferior | Superior |
| I_0 (mm d ⁻¹) | 234,730 | 10,000 | 300,000 |
| I_b (mm d ⁻¹) | 2,440 | 0,100 | 10,000 |
| h | 0,706 | 0,010 | 0,999 |
| K_s (d) | 2,290 | 0,010 | 10,000 |
| K_{sub} (d) | 10,000 | 10,000 | 500,000 |
| $R_{máx}$ (mm) | 0,000 | 0,000 | 9,000 |
| Alfa | 0,010 | 0,010 | 20,000 |

*Bravo et al. (2006)

Tabela 4. Parâmetros do modelo SWAT obtidos na etapa de calibração e limites recomendados.

| Parâmetro | Resultado da calibração | Limite recomendado | |
|------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|
| | | Inferior | Superior |
| Cn2 | *0,700 | 25,000 | 100,000 |
| Sol_awc (mm) | *0,804 | 0,100 | 0,400 |
| Esco | 0,037 | 0,000 ⁽¹⁾ | 1,000 ⁽¹⁾ |
| Sol_k (mm h ⁻¹) | *1,530 | 0,500 ⁽²⁾ | 150,000 ⁽²⁾ |
| Sol_z (mm) | *1,024 | 100,000 | 2550,000 |
| Ch_n2 (s m ^{-1/3}) | 0,107 | 0,000 ⁽¹⁾ | 1,000 ⁽¹⁾ |
| Alpha_bf (d) | 0,013 | 0,000 ⁽¹⁾ | 1,000 ⁽¹⁾ |
| Ch_k2 (mm h ⁻¹) | 24,918 | 0,000 ⁽¹⁾ | 150,000 ⁽¹⁾ |

Cn2 - curva número; Sol_awc - capacidade de água disponível no solo; Esco - fator de compensação da evaporação da água do solo; Sol_k - condutividade hidráulica do solo saturado; Sol_z - profundidade da camada de solo; Ch_n2 - coeficiente de Manning do canal principal; Alpha_bf - constante de recessão do aquífero; Ch_k2 - Condutividade hidráulica efetiva do canal; (1) Neitsch et al. (2005); (2) Moraes et al. (2003); *, sinal de multiplicação, significa que os valores default dos parâmetros são multiplicados pelo número seguinte ao “*”.

Os valores obtidos para os coeficientes de Nash-Sutcliffe (E_{NS}) nas etapas de calibração e validação, respectivamente, foram de 0,813 e 0,811 para o IPH II, e 0,61 e 0,72 para o SWAT, classificando os modelos como adequado e bom (IPH II) e satisfatório

(SWAT) para a simulação hidrológica da bacia, de acordo com a classificação proposta por van Liew et al. (2007). Os hidrogramas das vazões observadas e estimadas pelos modelos IPH II e SWAT podem ser visualizados nas Figuras 4 e 5 para as etapas de calibração e validação, respectivamente.

Figura 4. Hidrograma das vazões médias diárias observadas e estimadas pelos modelos hidrológicos IPH II e SWAT na etapa de calibração.

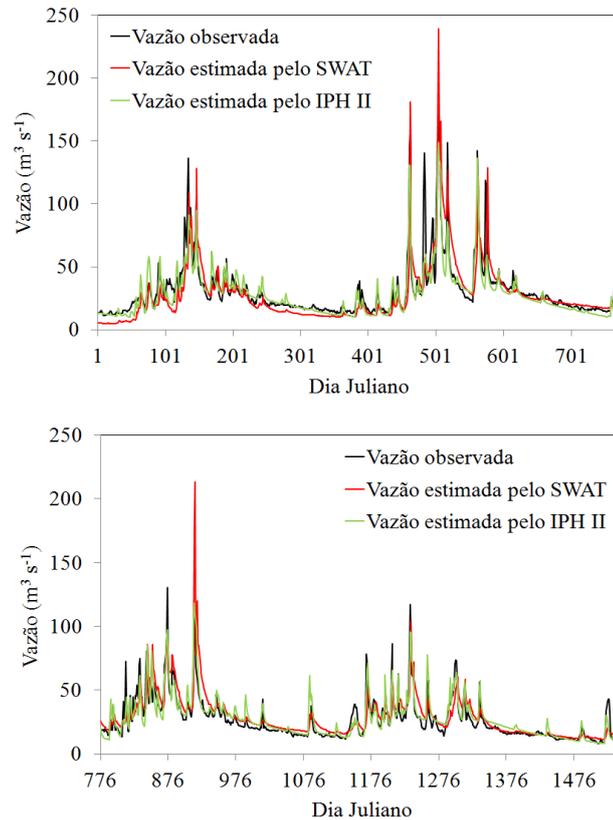
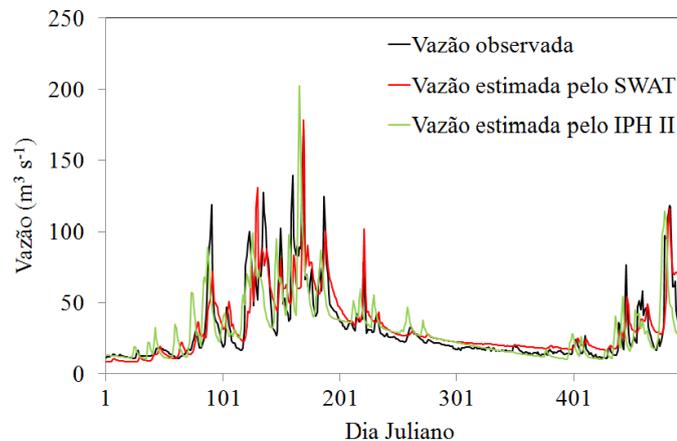


Figura 5. Hidrograma das vazões médias diárias observadas e estimadas pelos modelos hidrológicos IPH II e SWAT na etapa de validação.



Observa-se pelas Figuras 4 e 5, de maneira geral, uma boa concordância entre os valores estimados pelos modelos IPH II e SWAT e aqueles observados, porém o SWAT apresentou maior dificuldade em simular alguns valores de pico no período de calibração e o IPH II no período de validação. As vazões de pico são por natureza de difícil modelagem e estão relacionadas à variabilidade espacial e temporal das chuvas, associada ao baixo tempo de concentração do escoamento em bacias. Essa dificuldade também foi observada por outros autores, tais como Viola; Mello; Acerbi Junior (2009), Andrade; Mello; Beskow (2013) e Pereira et al. (2014a, 2014b). Uma análise mais detalhada sobre o comportamento dos modelos na predição das vazões diárias da sub-bacia do Rio Pomba, principalmente, as de pico, pode ser feita por meio das relações entre as vazões médias diárias observadas (O) e estimadas (P) pelos modelos IPH II e SWAT (Figuras 6 e 7).

Figura 6. Comparação entre as vazões médias diárias observadas e estimadas na etapa de calibração pelos modelos IPH II (a) e SWAT (b).

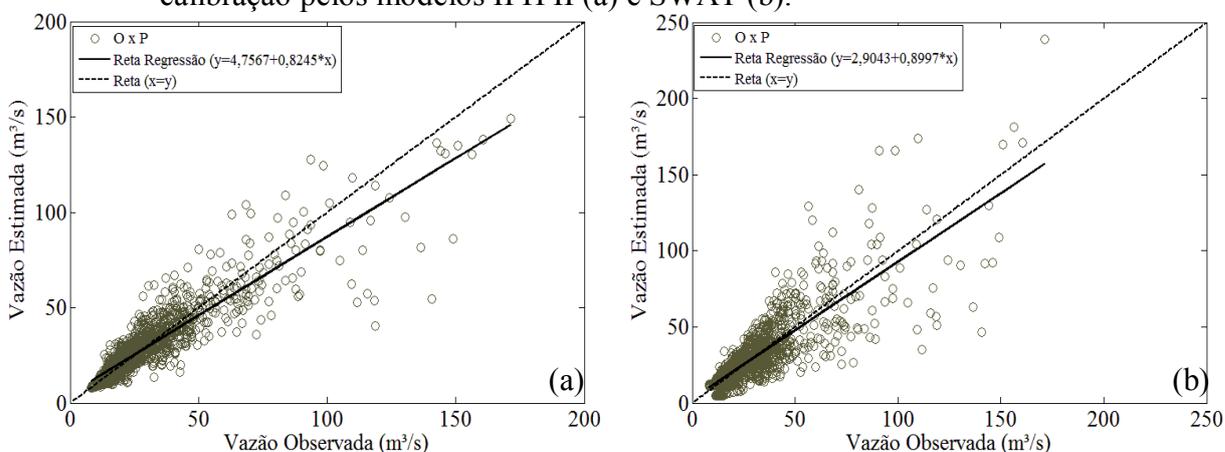
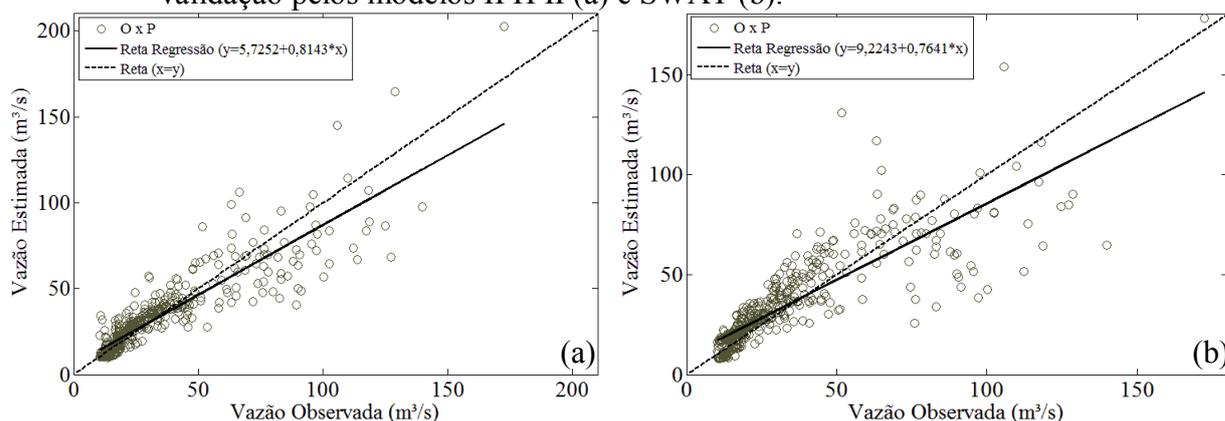


Figura 7. Comparação entre as vazões médias diárias observadas e estimadas na etapa de validação pelos modelos IPH II (a) e SWAT (b).



Nota-se, com base nas Figuras 6 e 7, que a partir do valor de vazão igual a $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ocorre uma dispersão maior entre os dados simulados pelos modelos e os observados em torno da reta 1:1. Observa-se, que essa dispersão a partir deste valor, é menor para o modelo SWAT na etapa de calibração e menor para o IPH II na validação, o que pode ser confirmado pelo coeficiente angular (Figuras 6 e 7 e Tabela 5). Para valores de vazão até este limiar ($50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), visualmente os dois modelos apresentam padrão semelhante. Essa análise corrobora com aquela feita com base nas Figuras 4 e 5, ou seja, para as vazões de pico, maiores que $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ os modelos apresentam dificuldades de predição. É possível afirmar por análise das Figuras 6 e 7 e com base nos coeficientes da regressão linear (Tabela 5) que os modelos, em geral, subestimam as vazões, principalmente as de maior magnitude.

A análise gráfica deve sempre vir acompanhada de estatísticas quantitativas quando se trata de comparação de desempenho de modelos (WILLMOTT, 1982). Portanto, na Tabela 5 estão apresentadas as medidas quantitativas do desempenho dos modelos IPH II e SWAT nas etapas de calibração e validação.

Tabela 5. Medidas quantitativas do desempenho dos modelos IPH II e SWAT.*

| | Etapa | \bar{O} (1) | \bar{P} (1) | N (2) | a (3) | b (3) | Viés | MAE (4) | RMSE (5) | d (6) | E_{NS} (7) | t (8) |
|--------|------------|---------------|---------------|---------|---------|---------|------|---------|----------|---------|--------------|----------------------|
| IPH II | Calibração | 28,8 | 28,5 | 1550 | 4,7567 | 0,8245 | -0,3 | 5,2 | 8,6 | 0,95 | 0,81 | 1,36 ^(ns) |
| | Validação | 31,6 | 31,5 | 500 | 5,7252 | 0,8143 | -0,1 | 6,5 | 10,9 | 0,95 | 0,81 | 0,30 ^(ns) |
| SWAT | Calibração | 28,8 | 28,8 | 1550 | 2,9043 | 0,8997 | 0,01 | 7,3 | 12,4 | 0,90 | 0,61 | 0,05 ^(ns) |
| | Validação | 31,6 | 33,4 | 500 | 9,2243 | 0,7641 | 1,8 | 8,3 | 13,3 | 0,92 | 0,72 | 2,98* |

(1) vazão média observada (\bar{O}) e estimada (\bar{P}); (2) N é o número de valores da amostra; (3) intercepto (a) e coeficiente angular (b) da regressão linear entre dados observados (O) e estimados (P); (4) erro absoluto médio; (5) quadrado médio do erro; (6) índice de concordância de Willmott; (7) índice de eficiência de Nash-Sutcliffe; (8) teste t pareado; (ns) Não significativo; *Significativo a 5% de probabilidade. Os termos N , b , d , E_{NS} e t são adimensionais, o MSE possui unidade em $(\text{m}^3/\text{s})^2$ e os demais termos possuem unidade em m^3/s .

Analisando os valores médios de vazão preditos pelos modelos durante os períodos de calibração e validação, percebe-se que o IPH II apresentou pequena subestimativa em relação aos valores observados (viés inferiores a 1%), tanto na calibração quanto na validação. Já o modelo SWAT superestimou a vazão média no período de validação em $1,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com erros de 5,7%, porém no período de calibração apresentou valor de vazão média muito próxima à observada (viés de 0,01). Com relação ao erro médio absoluto (MAE) nota-se uma diferença de erro de estimativa de, aproximadamente, $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ entre os dois modelos para os dois períodos analisados, com erros maiores proporcionados pelo SWAT.

Analisando os erros de estimativa em termos da raiz do erro quadrático médio (RMSE), verifica-se que os dados de vazão preditos pelo IPH II são $3,8$ e $2,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ inferiores aos preditos pelo modelo SWAT para os períodos de calibração e validação, respectivamente (Tabela 5) e, portanto, mais próximos aos observados. A diferença entre os resultados do MAE e RMSE decorre do fato da diferença entre valor predito e observado ($P_i - O_i$) ser elevada ao quadrado no cálculo do RMSE, o que tende a aumentá-lo, principalmente quando os valores máximos estão presentes. A diferença entre o MAE e a RMSE permite confirmar que os modelos IPH II e SWAT apresentaram, na maior parte das estimativas, erros relativamente pequenos.

O índice concordância (d) sugere que o modelo IPH II tem maior exatidão que o SWAT em 5% na calibração e 3% na validação, sendo essa melhor exatidão também apontada pelos valores do índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (E_{NS}) (Tabela 5).

Agora, analisando o desempenho dos modelos, com relação ao teste t pareado ao nível de 5% de significância, percebe-se que no modelo SWAT o valor de t foi não significativo na etapa de calibração, indicativo de que a diferença entre os valores observados e simulados é estatisticamente nula. Porém, na etapa de validação deste modelo, o valor de t foi significativo, o que demonstra que os valores observados e simulados pelo modelo diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância. Já para o modelo IPH II o teste t indicou que os valores observados e estimados não diferiram estatisticamente, ou seja, pode-se afirmar com 95% de probabilidade que a diferença entre os valores observados e simulados é nula.

Com base nestes resultados, pode-se afirmar estatisticamente que as estimativas das vazões com o modelo IPH II são confiáveis, o que o potencializa 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.

Apesar do modelo SWAT ter sido considerado satisfatório para a simulação da vazão média diária no período de validação, com base no coeficiente de Nash-Sutcliffe e na classificação proposta por van Liew et al. (2007), ele, estatisticamente, não é aceitável para a simulação neste período com base no teste t pareado ao nível de 5% de significância. O SWAT é um modelo complexo, que possui muitos parâmetros e exige muitas variáveis de entrada, necessitando de uma base de dados ampla que, na maioria das vezes, nas condições brasileiras, não se tem, e que pode explicar a falta de significância pelo teste t durante a validação do modelo.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos conclui-se que: i) o modelo IPH II pode ser aplicado na simulação das vazões médias diárias da sub-bacia do Rio Pomba com desempenho bom dado pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe e, estatisticamente, os resultados estimados não diferiram dos observados ao nível de 5% de significância dado pelo teste t pareado; ii) o modelo SWAT apresentou desempenho satisfatório para a simulação das vazões médias diárias da sub-bacia do Rio Pomba dado com base no coeficiente de Nash-Sutcliffe, porém, estatisticamente, os valores simulados diferiram dos observados pelo teste t pareado ao nível de 5% de significância para o período de validação; iii) o modelo IPH II apresentou maior exatidão na estimativa das vazões diárias do que o SWAT, apresentando maior 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.

7 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e Floresta Ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, p. 159-170, 2003.
- 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**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2013.
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, Temple, v. 34, p. 73-89, 1998.
- 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**, Campina Grande, v. 16, n. 4, p. 380-390, 2012.

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

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. New York: Lewis Publishers, 1998. 178 p.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**, European Geosciences Union, v. 5, p. 89-97, 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**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 73-95, 1999.

MORAES, J. M.; SCHULER, A. E.; GUANDIQUE, M. E. G.; MILDE, L. C.; GROPPPO, J. D.; MARTINELLI, L. A. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 61-70, 2003.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and water assessment tool Theoretical documentation**: version 2005. Temple: Soil and Water Research Laboratory, 2005a. 476 p. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/media/1292/swat2005theory.pdf> . Acesso em: 11 de jan. 2010.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and water assessment tool input/output file documentation**: version 2005. Temple: Soil and Water Research Laboratory, 2005b. 530 p. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/media/1292/swat2005theory.pdf> . Acesso em: 11 de jan. de 2010.

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**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2488-2493, 2009.

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.

RADAMBRASIL. Radar na Amazônia. **Levantamento de recursos naturais: Folhas SF-23/24 – Rio de Janeiro/Vitória: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1983. 780 p.

SÁ, T. D. A.; COSTA, J. P. R.; ROBERTS, J. M. Forest and pasture conductances in southern Pará, Amazonia. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R. L. **Amazonian deforestation and climate**. Chichester: John Wiley & Sons, 1996. p. 241-264.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; VASCONCELOS, B. N.; CORREA, G. R.; FARIA, M. M.; GIACOMIN, G.; MORAES, M. L. B.; MICHEL, R. F. M.; CRUZ, L. O. M. **Levantamento de solos e aptidão agrícola das terras da bacia do Rio Paraíba do Sul, Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS-ABRH, 2005.

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.

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**, Lincoln, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

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.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin-American Meteorological Society**, Newark, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.

ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; MONTEBELLER, C. A. Adequação dos parâmetros do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson em condições de campo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 10, p. 1021-1029, 2010.