

MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O IPH II: ESTUDO DE CASO PARA UMA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TELES PIRES

Talisson Sáteles Matos¹ & Marionei Fomaca de Sousa Junior^{1} & Denise Aline Wenzel¹ & Eduardo Morgan Uliana¹ & Frederico Terra de Almeida¹ & Luana Lisboa² & Múcio André dos Santos Alves Mendes¹*

Resumo – O objetivo do trabalho foi calibrar e avaliar o desempenho do modelo IPH II para uma sub-bacia do rio Teles Pires localizada no Estado de Mato Grosso. A calibração foi realizada de forma automática utilizando como função objetivo o desvio absoluto médio. Para validar e verificar o desempenho do modelo na estimativa das vazões foram utilizadas as seguintes medidas estatísticas: raiz do erro quadrático médio, erro absoluto médio, no viés, índice de concordância de Willmott, coeficiente de Nash-Sutcliffe (E_{NS}), e teste t pareado ao nível de 5% de significância. Os valores de E_{NS} obtidos nas etapas de calibração e validação foram de 0,91 e 0,84, respectivamente, demonstrando desempenho adequado e bom do modelo para estimativa das vazões diárias na seção de monitoramento analisada. Com base nesse resultado e nos demais conclui-se que: o modelo IPH-II é eficaz na estimativa de vazões diárias na área de estudo e pode ser utilizado para subsidiar a elaboração de cenários de planejamento e gestão de recursos hídricos, previsão e mitigação de eventos extremos bem como para análise de consistência e preenchimento de falhas de dados de vazões.

Palavras-chave – modelo conceitual, calibração automática, bacia amazônica.

HYDROLOGICAL MODELING WITH THE IPH II: CASE STUDY ON THE HYDROGRAPHIC SUB-BASIN OF TELES PIRES RIVER

Abstract – The aims of this work was calibrate and available IPH II models performance to sub-basin in the Teles Pires river located in Mato Grosso state. The calibration has been realized in automatic form, using the mean absolute deviation as the objective function. To validate and verify model's performance at flow valuation were used following statistical measure: root-mean-square error, mean absolute error, in bias, Willmott's concordance index, Nash-Sutcliffe (E_{NS}) coefficient, paired t-test at the 5% significance level. E_{NS} values achieved in the calibration and validation steps were 0,91 and 0,84, respectively, exhibiting appropriate performance of model to estimate daily flows at analyzed monitoring scheme. Based on this result and others the conclusion is: IPH-II models is efficient to estimate diary flows on study area and can be used to subsidize scenario planning preparation and water resources management, prediction and mitigation extremes events as well as to analyses consistency and filling of flows data gaps.

Keywords – Conceptual model, automatic calibration, amazon basin.

INTRODUÇÃO

Os modelos hidrológicos de transformação chuva-vazão podem ser utilizados para obter diferentes tipos de informação, necessárias para subsidiar a tomada de decisão no planejamento dos recursos hídricos, dentre as quais se podem citar a previsão de vazões, cálculo de eventos de projetos, avaliação de estratégias operacionais, extensão de séries de vazão e previsão de resposta da bacia ante modificações climáticas (Bravo *et al.* 2006; Tucci *et al.* 2003).

¹Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), talisson07@hotmail.com

²Serviço Geológico do Brasil - CPRM

Dentre os diversos modelos hidrológicos existentes, no Brasil destaca-se o modelo conceitual IPH-II, desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) com o objetivo de ser utilizado em projetos de engenharia de recursos hídricos de bacias rurais e urbanas (Tucci 2005). O desenvolvimento do modelo baseia-se num algoritmo de separação de escoamento desenvolvido por Berthelot (1970). O autor utiliza a equação da continuidade em combinação com a equação de Horton (1937) e uma função empírica de percolação (Bravo *et al.* 2006). Seu número reduzido de parâmetros o torna simples e de fácil manuseio, possibilitando seu uso em diferentes tipos de bacias hidrográficas.

Os modelos de transformação de chuva em vazão, caso do modelo IPH II, possuem parâmetros que representam abstrações da realidade, não podendo ser medidos. Nessas circunstâncias, o ajuste dos valores dos parâmetros é realizado por meio de calibração manual ou automática, com base nas informações hidrológicas existentes na bacia (Bravo *et al.* 2006). Tal ajuste se dá de forma individual para cada bacia hidrográfica a ser estudada visto que os valores dos parâmetros são influenciados segundo Lelis *et al.* (2012) pelo uso e ocupação do solo, pela topografia e por outros fatores físicos e climáticos, os quais são variáveis nas áreas de drenagem.

A bacia do rio Teles Pires possui potencial de geração de energia elétrica de aproximadamente 3.697,0 MW o que potencializa a implantação de empreendimentos hidrelétricos, necessitando ainda mais a quantificação da disponibilidade hídrica e a previsão de eventos extremos. Além disso, a região do médio e alto rio Teles Pires está entre os 16 principais polos nacionais de irrigação por pivô central e possui potencial de aumento da área irrigada, segundo a Agência Nacional de Águas - ANA (2016).

Tendo em vista a importância da modelagem hidrológica para a estimativa de dados que subsidiem a gestão dos recursos hídricos, o presente trabalho teve como objetivo analisar o desempenho do modelo IPH-II na previsão de vazões médias diárias de uma sub-bacia hidrográfica do Rio Teles Pires.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo foi uma sub-bacia do rio Teles Pires, localizada à montante da estação fluviométrica Cachoeirão (Tabela 1 e Figura 1) com área de drenagem de 34.689,6 km² e perímetro de 2.197,3 km, localizada no estado de Mato Grosso – Brasil. O comprimento total dos cursos de água é de 15.265,4 km e o comprimento axial da bacia de 380,7 km.

As informações das estações pluviométricas, fluviométrica e meteorológica utilizadas no trabalho estão representadas na Tabela 1 e suas localizações podem ser observadas na Figura 1.

Tabela 1. Estações hidrometeorológicas utilizadas no trabalho

Código	Estação	Latitude°	Longitude°	Instituição	Nome
17280000	Fluviométrica	-11,70	-55,70	ANA	Cachoeirão
1453000	Pluviométrica	-14,61	-53,99	ANA	Passagem da BR-309
1454000	Pluviométrica	-14,41	-54,04	ANA	Paranatinga
1356002	Pluviométrica	-13,81	-56,12	ANA	Nova Mutum
1355001	Pluviométrica	-13,55	-55,33	ANA	Porto Roncador
1255001	Pluviométrica	-12,67	-55,79	ANA	Teles Pires
1255002	Pluviométrica	-12,51	-54,91	ANA	Rio Ferro
1154001	Pluviométrica	-11,92	-54,99	ANA	Santa Felicidade
83214	Meteorológica	-10,25	-54,91	INMET	Matupá

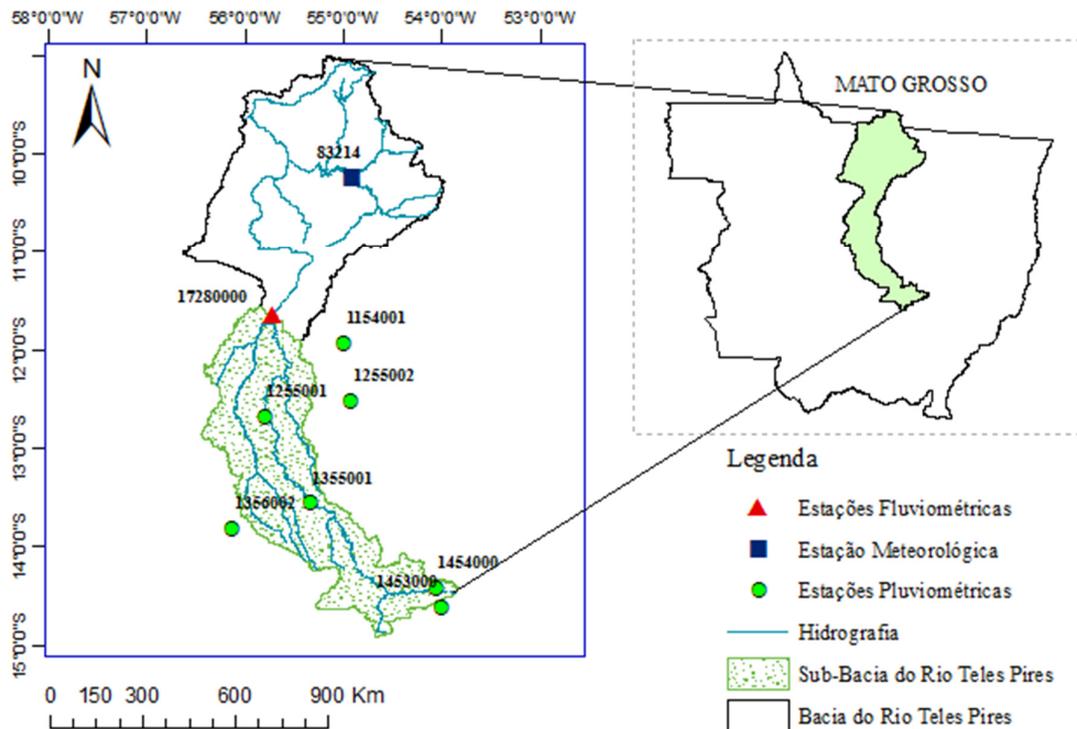


Figura 1- Localização da bacia hidrográfica do Rio Teles Pires e da seção de controle Cachoeirão, das estações pluviométricas, fluviométrica e meteorológica que foram utilizadas no estudo.

O IPH II (Tucci, 2005) é um modelo concentrado que requer como variáveis de entrada dados de precipitação e evapotranspiração de referência. Tal modelo é composto pelos algoritmos de separação do escoamento, perdas por evaporação e interceptação, propagação do escoamento superficial e propagação do escoamento subterrâneo. (Bravo *et al.* 2006; Pereira *et al.* 2016).

Com os dados hidrometeorológicos disponíveis das estações pluviométricas em estudo foi utilizado o método dos Polígonos de Thiessen, conforme descreveu Uliana; Martins; Reis (2011), para determinar a precipitação média da bacia hidrográfica. A evapotranspiração de referência foi estimada com o método de Camargo (1971).

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).

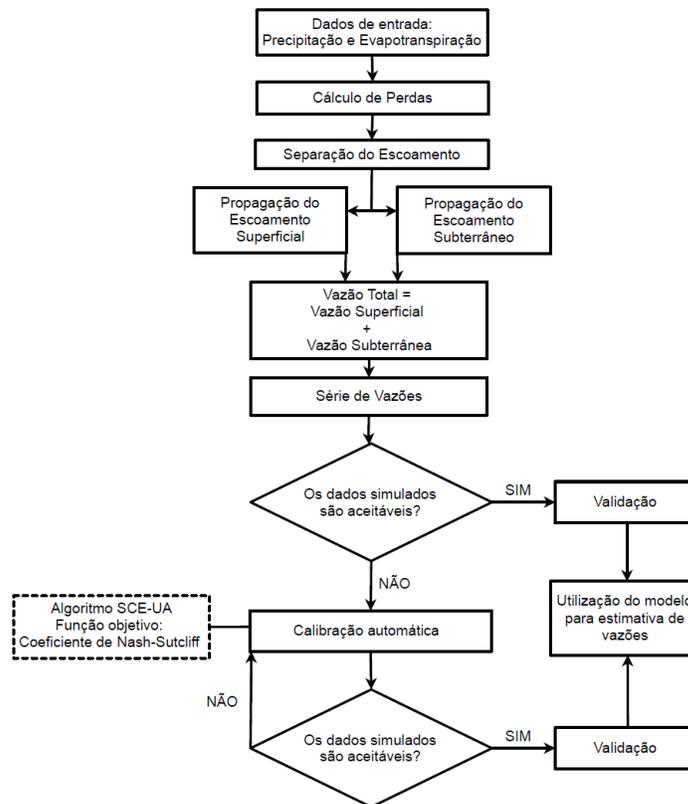


Figura 2 - Representação esquemática com as principais atividades executadas para a estimativa das vazões utilizando o modelo IPH II.

Calibração, Validação e Desempenho

Para calibração e obtenção dos parâmetros foi utilizado o período correspondente de 01/05/1998 a 31/12/2001 totalizando 1341 dias observados. Já para a validação do modelo foi estipulado o período de 01/05/2005 a 31/12/2008, quantificando 1341 dias de observações. Ambas as etapas foram realizadas no software WIN-IPH2, desenvolvido por Bravo *et al.* (2006).

O processo de calibração foi executado de forma automática utilizando o algoritmo SCE-UA, para tanto foi utilizado como função objetivo o desvio absoluto médio. A avaliação do desempenho do modelo nas etapas de calibração e validação foi realizada utilizando as medidas estatísticas descritas por Willmott (1982) e Krause *et al.* (2005): erro absoluto médio (MAE); raiz do erro quadrático médio (RMSE); viés; coeficiente Nash-Sutcliffe (E_{NS}); índice de concordância de Willmott (d); e teste t pareado com 5% de significância.

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 $E_{NS} < 0,36$ indica que o modelo não é satisfatório. O índice de concordância de Willmott varia de 0 a 1, onde 1 indica concordância perfeita.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos parâmetros obtidos na etapa de calibração automática com auxílio do algoritmo SCE-UA estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do modelo IPH II obtidos na etapa de calibração e limites recomendados para uma sub-bacia hidrográfica do Rio Teles Pires, seção de controle Cachoeirão.

Parâmetro	Resultado da calibração	Limites utilizados	
		Inferior	Superior
I_o (mm d ⁻¹)	21,953	10,000	500,000
I_b (mm d ⁻¹)	4,038	0,100	30,000
h	0,548	0,010	0,999
K_s (d)	25,000	0,010	25,000
K_{sub} (d)	224,935	1,000	800,000
$R_{máx}$ (mm)	5,000	5,000	15,000
Alfa	7,123	0,010	20,000

I_o : capacidade de infiltração correspondente; I_b : capacidade infiltração do solo saturado; h: parâmetro do modelo; K_s : tempo médio de esvaziamento do reservatório; K_{sub} : tempo médio de esvaziamento do reservatório subterrâneo; $R_{máx}$: reservatório de capacidade máxima; Alfa: parâmetro do modelo.

Os hidrogramas das vazões previstas pelo modelo IPH-II e as observadas nas etapas de calibração e validação podem ser observados nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

Por meio de uma análise visual das informações das Figuras 4 e 5, percebe-se que o modelo estimou adequadamente as vazões diárias da seção de controle em ambas as etapas. No entanto, verifica-se que perdeu acurácia na estimativa de alguns valores de vazões extremas, o que foi relatado também por outros autores, como Viola *et al.* (2009) e Andrade *et al.* (2013).

Segundo Pereira *et al.* (2016), as vazões de pico são por natureza de difícil modelagem e estão relacionadas, dentre outros motivos, à variabilidade espacial e temporal das chuvas.

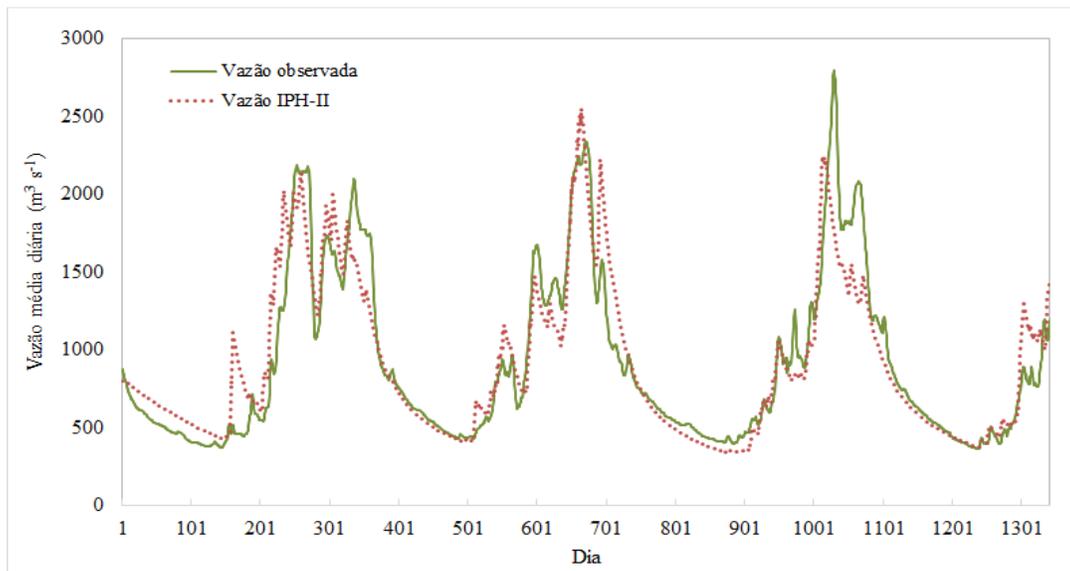


Figura 4 – Hidrograma das vazões médias diárias observadas e estimadas pelo modelo hidrológico IPH-II na etapa de calibração para uma sub-bacia hidrográfica do Rio Teles Pires, seção de controle Cachoeirão.

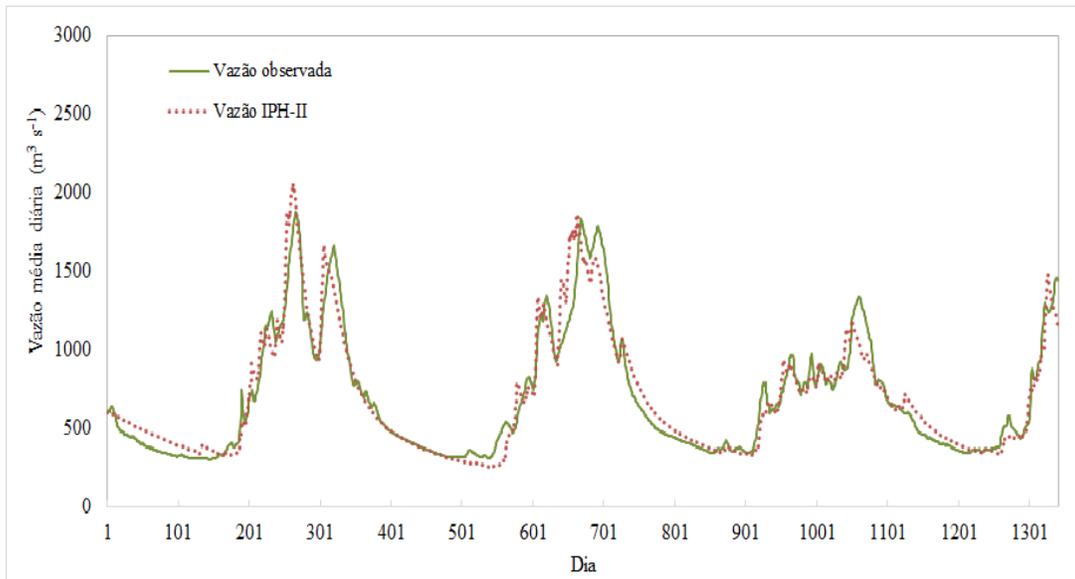


Figura 5 – Hidrograma das vazões médias diárias observadas e estimadas pelo modelo hidrológico IPH II na etapa de validação para uma sub-bacia hidrográfica do Rio Teles Pires, seção de controle Cachoeirão.

Na Tabela 3 estão apresentadas para a sub-bacia hidrográfica estudada as medidas estatísticas que possibilitaram a análise do desempenho do modelo IPH II nas etapas de calibração e validação.

Tabela 3- Medidas estatísticas do desempenho do modelo IPH-II

Etapa	$Q_{obs}^{(1)}$	$Q_{est}^{(2)}$	MAE ⁽³⁾	RMSE ⁽⁴⁾	Viés	$d^{(5)}$	$E_{NS}^{(6)}$	$t^{(7)}$
Calibração	690,79	695,67	76,31	111,91	-4,87	0,98	0,92	1,60 ^{NS}
Validação	906,16	908,31	143,45	216,78	-2,14	0,95	0,84	0,36 ^{NS}

(1): vazão média observada; (2): vazão média estimada; (3): erro absoluto médio; (4): raiz do erro quadrático médio; (5): índice de eficiência de Nash-Sutcliffe; (6): índice de concordância de Willmott; (7): teste t pareado; (NS): não significativo. Os termos d , E_{NS} e t são adimensionais, já o restante é em m^3/s .

De acordo com a classificação do índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (E_{NS}) e analisando os valores apresentados na Tabela 3 é possível afirmar que o modelo IPH II foi adequado e bom para a estimativa das vazões diárias na seção de controle Cachoeirão (17280000), tanto na etapa de calibração quanto na de validação.

Já os valores do índice de concordância de Willmott apresentaram valores próximos a 1, indicando boa concordância entre os valores de vazões observados e estimados.

O teste t pareado ao nível de 5% de significância demonstra que nas etapas de calibração e validação não há diferença significativa entre os dados preditos e observados.

Os valores do viés indicaram que as vazões foram superestimadas tanto na etapa de calibração quanto na etapa de validação, aproximadamente $5 m^3 s^{-1}$ (viés $-4,87 m^3/s$) e $2,0 m^3 s^{-1}$ (viés $-2,14 m^3/s$), respectivamente.

Os valores do erro absoluto médio (MAE) e da raiz do erro quadrático médio (RMSE) das etapas de calibração e validação variaram entre 76,31 e 143,45 $m^3 s^{-1}$ e entre 111,91 e 216,78 $m^3 s^{-1}$, respectivamente. Além disso, o distanciamento entre os valores de MAE e RMSE permite afirmar que a variância dos erros individuais é pequena (Tabela 3).

Ao analisar as medidas quantitativas do desempenho do modelo, apresentadas na Tabela 3, percebe-se que o modelo apresentou erro maior na etapa de validação. No entanto, percebe-se que a perda de desempenho foi aceitável e que o modelo IPH-II estima as vazões com acurácia. Esse resultado também demonstra que a calibração automática do modelo com o algoritmo de otimização SCE-UA foi eficaz.

A redução do desempenho do modelo hidrológico chuva-vazão na etapa de validação também foi relatada por outros autores, como Fukunaga *et al.* (2015), Monteiro *et al.* (2015) e Neto *et al.* (2014).

Os resultados da calibração e validação do modelo IPH II para a sub-bacia do rio Teles Pires, seção de controle Cachoeirão, demonstraram 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.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos conclui-se que:

- A calibração automática com o algoritmo de otimização SCE-UA possibilita a estimativa dos parâmetros do modelo IPH II de forma eficiente.
- O modelo IPH II apresenta dificuldade para simular alguns valores extremos de vazões;
- O modelo IPH-II é eficaz na previsão de vazão diária na sub-bacia do Rio Teles Pires, seção de controle Cachoeirão, podendo ser utilizado para o planejamento e a gestão de recursos hídricos na bacia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT) pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa (Processo: 189567/2015).

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA) - (2016). *Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil: relatório síntese*. Brasília: ANA, pp. 33.
- ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. (2013). 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, pp. 69-76.
- BERTHELOT, R. (1970). Curso de Hidrologia Sintética. Porto Alegre. IPH, UFRGS.
- BRAVO, M. J.; ALLASIA, D. G.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. E. M. (2006). *WIN_IPH2: Modelo IPH2 para Windows®*. Manual de Conceitos Versão 1.0. UFRGS/IPH.
- CAMARGO, A. P. (1971). *Balanço hídrico no estado de São Paulo*. 3.ed. Campinas: IAC, pp. 24. Boletim n.116.
- FUKUNAGA, D. C.; CECILIO, R. A.; ZANETTI, S. S.; OLIVEIRA, L. T.; CAIADO, M. A. C. (2015). Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. *Catena*, v. 125, pp. 206-213.

- KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, European Geosciences Union, v. 5, pp. 89-97.
- HORTON, R. E. (1937). Analysis of runoff plot experiments with varying infiltration capacity, *Trans. Am. Geoph. Union*, par IV, pp. 693.
- LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O. (2012). Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 2, pp. 623-634.
- MONTEIRO, J. A.; STRAUCH, M.; SRINIVASAN, R.; ABBASPOUR, K.; GUCKER, B. (2015). Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. *Hydrological Processes*, v. 30, n. 9, pp. 1419-1430.
- NETO, J. de O. M.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; MELLO JUNIOR, A. V. (2014). Simulação Hidrológica Escalar com o Modelo SWAT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, pp. 177-188.
- PEREIRA, D. dos R.; ULIANA, E. M.; MARTINEZ, M. A.; SILVA, D.D da (2016). Performance of a lumped and a semi-distributed hydrologic model in predicting daily flow rates. *Irriga*, v.12, n.2, pp. 409-424.
- TUCCI, C. E. M. (2005). Modelos Hidrológicos. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS e ABRH, pp. 678.
- TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; COLLISCHONN, W. (2003). *Previsão de Vazões com Base na Previsão Climática*. Brasília: ANEEL.
- ULIANA, E.M.; MARTINS, C.A.S.; REIS, E. F. (2011) Análise Estatística das Vazões e da Precipitação Utilizando Modelos Probabilísticos na Bacia Hidrográfica do Rio São José. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v. 7, n. 13, pp.1527-1539.
- VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. (2007). Suitability of SWAT for the Conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, Lincoln, v. 12, n. 2, pp. 173-189.
- VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; ACERBI JUNIOR, F. W. (2009). Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 13, n. 5, pp. 581-590.
- WILLMOTT, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin-American Meteorological Society, Newark*, v. 63, n. 11, pp. 1309-1313.