

Uso do modelo SWAT para predição da vazão em sub-bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha/MG.

Nathalia Drummond Marques da Silva¹
Alline Zagnoli Villela Motta¹
Cristiano Christofaro¹

¹ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM
Rodovia MGT 367, Km 583, 5000 - 39100-000 - Diamantina - MG, Brasil.
nathalia.florestal@yahoo.com.br, allinezvm@gmail.com, cristiano.christofaro@ufvjm.edu.br.

Abstract. Human pressure on the biosphere affects water circulation and availability. The need to simulate the effect of human activities in watersheds has stimulated the use of spatial hydrologic models like SWAT (Soil and Water Assessment Tool). This study aims to simulate the flow response of a Jequitinhonha River watershed (Itamarandiba do Campo River) to climatic, edaphic and soil management variables. The input variables were generated from Digital Elevation Model (SRTM), land use classification (Landsat 8) and regional soil maps. The hydrological model SWAT was calibrated and validated for the watershed using 10 hydrological parameters, considering monthly data flow obtained from 1997 to 2007. Calibration and validation reached, respectively, values of 0.53 and 0.60, for the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (COE), values of 0.69 and 0.64, for the ratio of the root mean square error to the standard deviation of measured data (RSR), and values of -18.6 and -28.5, for the Percent Bias (PBIAS). Most of the coefficients produced satisfactory results according to the evaluation criteria adopted, except for PBIAS in validation stage. There was a significant improvement in quantitative statistics compared to the initial simulation. Despite the limitations of the available input data, estimated values satisfactorily followed the general pattern of the observed flow, demonstrating the applicability of the model in the water resources management of the region.

Palavras-chave: GIS, simulation, hydrologic modeling, image processing, water resources, SIG, simulação, modelagem hidrológica, processamento de imagem, recursos hídricos

1. Introdução

Pressões humanas sobre a biosfera, como o aumento na concentração de gases causadores do efeito estufa (GEE), geram impactos na disponibilidade hídrica em âmbito global e regional ao afetar o ciclo hidrológico e eventos extremos (Marengo *et al.*, 2011). Fatores como a má distribuição da água, tanto espacial quanto temporal, poluição e uso desordenado, bem como o crescimento demográfico e econômico agravam este cenário (Barros e Amin, 2008). Essas perturbações nas bacias hidrográficas podem significar interferência em diversas atividades regionais, levando a conflitos de uso.

Modelos hidrológicos como o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) (Arnold *et al.*, 1998) têm sido utilizados em todo o mundo para prever o efeito das ações antrópicas sobre a hidrosfera, considerando a grande heterogeneidade dos sistemas envolvidos (Tucci e Clarke, 1997). O uso de modelos hidrológicos integrados a Sistemas de Informações Geográficas (SIG) tem demonstrado eficiência no manejo de recursos hídricos, visto que permitem a visualização e integração de diversas informações topográficas, morfométricas, entre outras, e a criação de mapas (Medeiros e Silva, 2014). A inserção de informações espaciais e temporais como dados geográficos, em oposição a uma grande quantidade de arquivos textuais, torna menos complexa sua execução (Olivera *et al.*, 2006)

Contudo, para que sejam efetivamente aplicados, os modelos hidrológicos devem passar por uma etapa de calibração, na qual parâmetros selecionados são ajustados em relação a dados medidos em campo (Brighenti *et al.*, 2016). Com o modelo ajustado às condições da bacia, a validação do componente de interesse (e. g. vazão) em uma série diferente da utilizada na calibração, indicará se o modelo é capaz de reproduzi-la adequadamente (Arnold *et al.*, 2012a; Lelis *et al.*, 2012).

O objetivo deste estudo é realizar a calibração e validação do modelo hidrológico SWAT para refinar as estimativas de vazão mensal de uma sub-bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha/MG.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de Estudo

A área de estudo está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha, drenada por trecho do Rio Itamarandiba do Campo, com exutório localizado nas coordenadas geográficas 18°04'58" sul e 42°49'58" oeste, no município de Itamarandiba, Minas Gerais. Apresenta área de 15.270,81 hectares, correspondendo a 5,58% do município de Itamarandiba (Figura 1).

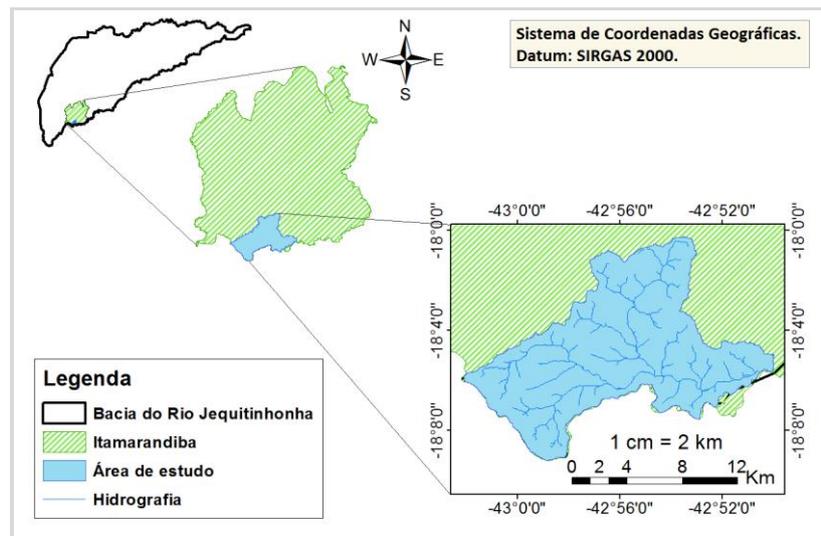


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

O clima da região segundo Köppen e Geiger (1928) é Cwa. Apresenta verão chuvoso com temperaturas elevadas, inverno seco com poucas precipitações e temperaturas relativamente mais baixas (Silva e Ferreira, 2011). A precipitação média anual é de 1.081 mm e a temperatura média anual é de 20,1°C (Jesus *et al.*, 2012). A vegetação nativa predominante nesta área é o cerrado, apresentando consideráveis manchas de florestas estacionais (Ferreira e Silva, 2012).

2.2 Modelagem, Calibração e Validação

O SWAT utiliza como entradas dados tabulares e espaciais. Os dados tabulares são compostos por variáveis climáticas (temperatura, pluviosidade, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento) e parâmetros dos solos. Já os dados espaciais são constituídos pelo modelo digital de elevação (DEM), mapa de tipos de solos e de manejo da região (Figura 2).

Para criação dos DEMs foram utilizadas imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de 30 metros (USGS, 2015a). A partir da topografia, representada pelos DEMs, a bacia hidrográfica é delimitada e subdividida em sub-bacias. Essas sub-bacias são então subdivididas em porções hidrológicamente homogêneas (Fan *et al.*, 2015), que apresentam combinação única de declividade, tipos e usos do solo, denominadas unidades de resposta hidrológica (HRU) (Arnold *et al.*, 2012b).

A caracterização do uso e ocupação do solo foi efetuada por análise de imagem do satélite Landsat 8 (USGS, 2015b), órbita/ponto 217/073 de 05 de agosto de 2014, considerando as classes: floresta plantada, mata nativa, cerrado, pastagem e solo exposto. Para caracterização

dos tipos de solos, utilizou-se o mapa de solos brasileiros da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2001).

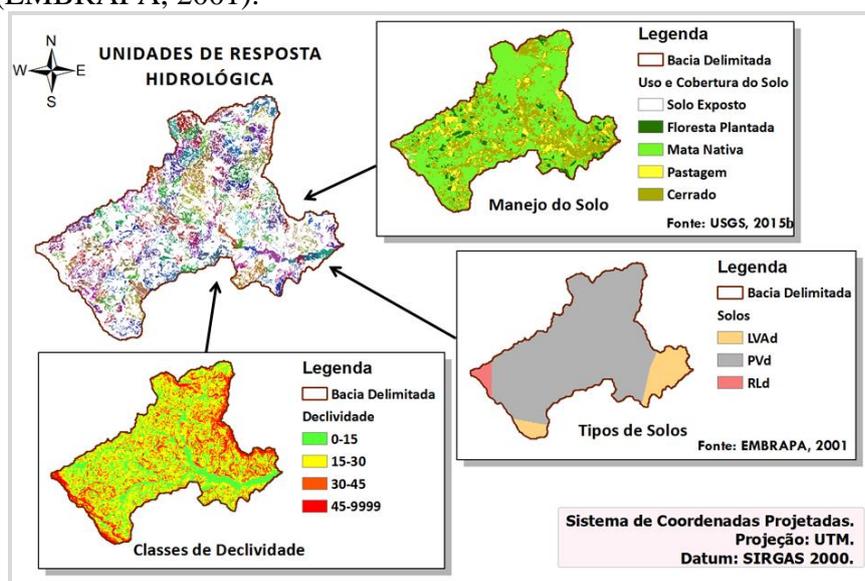


Figura 2. Mapas de manejo, tipos de solos e classes de declividade, utilizados para a criação das HRUs.

A simulação foi configurada a partir de uma série de 11 anos de dados climáticos, entre janeiro de 1997 e dezembro de 2007, da estação meteorológica 83488 de Itamarandiba (INMET, 2014), considerando ser esse o maior período sem falhas significativas nos registros de vazão da estação fluviométrica 54234000 (ANA, 2015), localizada no exutório da área de estudo. Os três primeiros anos do intervalo de simulação, de janeiro de 1997 a dezembro de 1999, foram determinados como o período de aquecimento do modelo (*warm up*). Esse tempo é utilizado para a estabilização do sistema, uma vez que suas condições iniciais não são conhecidas (Norato e Duarte, 2011).

Os dados de vazão mensal observada na estação fluviométrica e os parâmetros estimados pelo SWAT, ambos dos anos 2000 a 2004, foram transferidos para calibração no SWAT-CUP (Abbaspour, 2015). A aproximação dos parâmetros à realidade da área de estudo foi feita por meio do algoritmo SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting*, versão 2) (Abbaspour *et al.*, 2007). A seleção dos parâmetros utilizados na calibração foi baseada em revisão bibliográfica (Lelis *et al.*, 2012; Dantas *et al.*, 2015; Begou *et al.*, 2016). Foram efetuadas sete iterações, padronizadas com 500 simulações cada (Abbaspour, 2015), até a obtenção de um intervalo (valores mínimos e máximos) adequado às condições da bacia. A avaliação dos resultados foi feita a partir do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) (Nash e Sutcliffe, 1970). Também foram utilizados os indicadores: Razão entre o erro médio quadrático e o desvio padrão dos dados observados (RSR), e o Percentual de Tendência (PBIAS), seguindo os critérios propostos por Moriasi *et al.* (2007) (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação do desempenho do ajuste de acordo com o valor do COE, RSR e PBIAS (Moriasi *et al.*, 2007):

Classificação	COE	RSR	PBIAS
Não satisfatório	$COE \leq 0,5$	$RSR > 0,70$	$PBIAS \geq \pm 25$
Satisfatório	$0,50 < COE \leq 0,65$	$0,60 < RSR \leq 0,70$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Bom	$0,65 < COE \leq 0,75$	$0,50 < RSR \leq 0,60$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Muito bom	$0,75 < COE \leq 1,00$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$PBIAS < 10$

Uma vez alcançados valores satisfatórios para as funções objetivo na calibração, os intervalos dos parâmetros calibrados foram utilizados na validação do modelo, considerando os 3 últimos anos de dados, de 2005 a 2007.

3. Resultados e Discussão

A necessidade de adequar parâmetros foi avaliada a partir da comparação dos valores originais, simulados no modelo SWAT, com os dados observados. Os valores de COE = -2,94; RSR = 1,99 e PBIAS = -50,5 demonstraram discrepância entre os dados comparados, e o desempenho da simulação inicial foi considerado insatisfatório.

Na tabela 2 constam os parâmetros selecionados, sua descrição e a faixa de valores obtida. Os parâmetros relacionados ao solo foram alterados pelo o método de multiplicação, visto que estes apresentam diferentes valores ao longo da bacia (Carvalho, 2014). Para os demais parâmetros, utilizou-se o método de substituição de valores.

Tabela 2. Descrição, método de alteração e intervalos de valores obtidos para os parâmetros utilizados no modelo SWAT, após calibração, para caracterização da vazão na bacia do Rio Itamarandiba do Campo/MG.

Parâmetros	Descrição	Método de alteração	Valor mínimo	Valor máximo
CN2	Valor da curva número para a condição média de umidade do solo	Multiplicação	-0,486	-0,368
SOL_Z	Profundidade da camada de solo	Multiplicação	0,273	0,292
SOL_BD	Densidade aparente do solo	Multiplicação	-0,161	-0,132
SOL_AWC	Capacidade de armazenamento de água no solo	Multiplicação	0,746	0,812
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo	Multiplicação	1,810	1,884
ESCO	Fator de compensação da evaporação da água do solo	Substituição	0,052	0,126
RCHRG_DP	Fração de percolação para o aquífero profundo	Substituição	0,456	0,547
ALPHA_BF	Fator alfa de recessão do fluxo de base	Substituição	0,000	0,022
GW_DELAY	Tempo de atraso para recarga do aquífero	Substituição	41,176	51,837
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal	Substituição	102,519	123,074

Na sétima iteração, a aplicação dos intervalos apontados resultou em 78 simulações com coeficiente de Nash-Sutcliffe maior que 0,5. Na melhor estimativa, atingiu-se um COE = 0,53; RSR = 0,69 e PBIAS = -18,6; todos indicando um ajuste satisfatório. Na etapa de validação, o mesmo intervalo aplicado alcançou um total de 337 simulações satisfatórias para o COE. Obteve-se COE = 0,60 e RSR = 0,64 e PBIAS = -28,5 para a melhor estimativa. Assim, a maior parte dos coeficientes calculados chegou a valores satisfatórios, exceto o PBIAS na etapa de validação, segundo os critérios de avaliação adotados.

3.1 Análise Gráfica

A Figura 3 apresenta a distribuição dos dados observados e dos dados originalmente simulados pelo SWAT para os 96 meses utilizados, de janeiro de 2000 a dezembro de 2007.

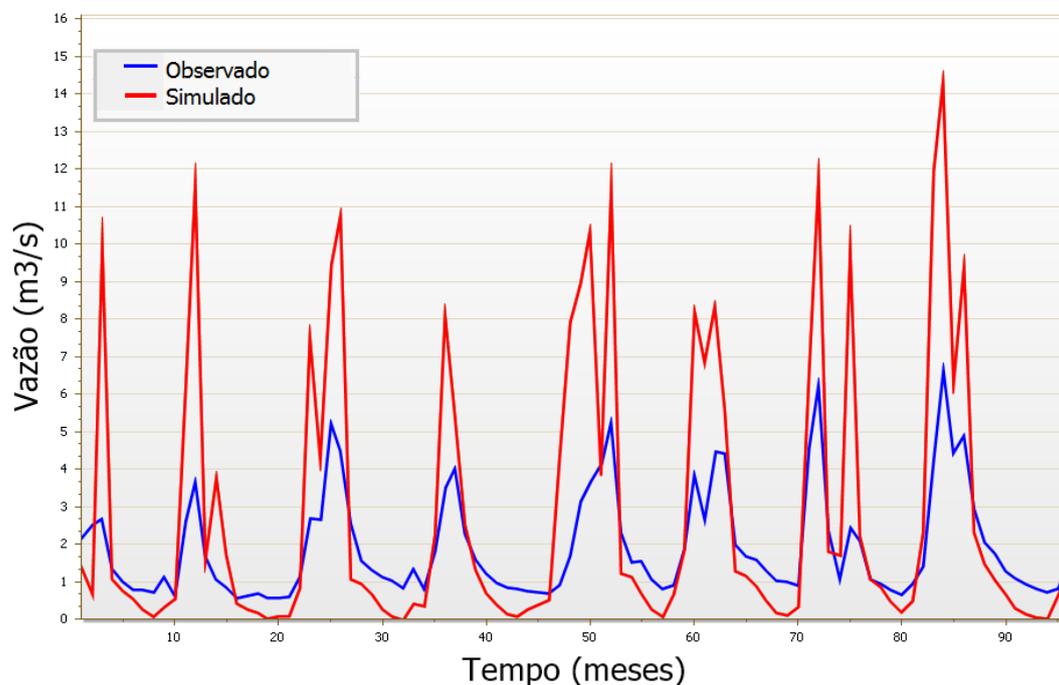


Figura 3. Distribuição dos dados observados e dos dados inicialmente simulados no SWAT.

As Figuras 4 e 5 demonstram a distribuição dos dados observados e daqueles correspondentes à melhor simulação de vazão. A Figura 4 corresponde aos 60 meses utilizados na calibração, entre janeiro de 2000 e dezembro de 2004. A Figura 5 apresenta os resultados relativos aos 36 meses da validação, entre janeiro de 2005 e dezembro de 2007.

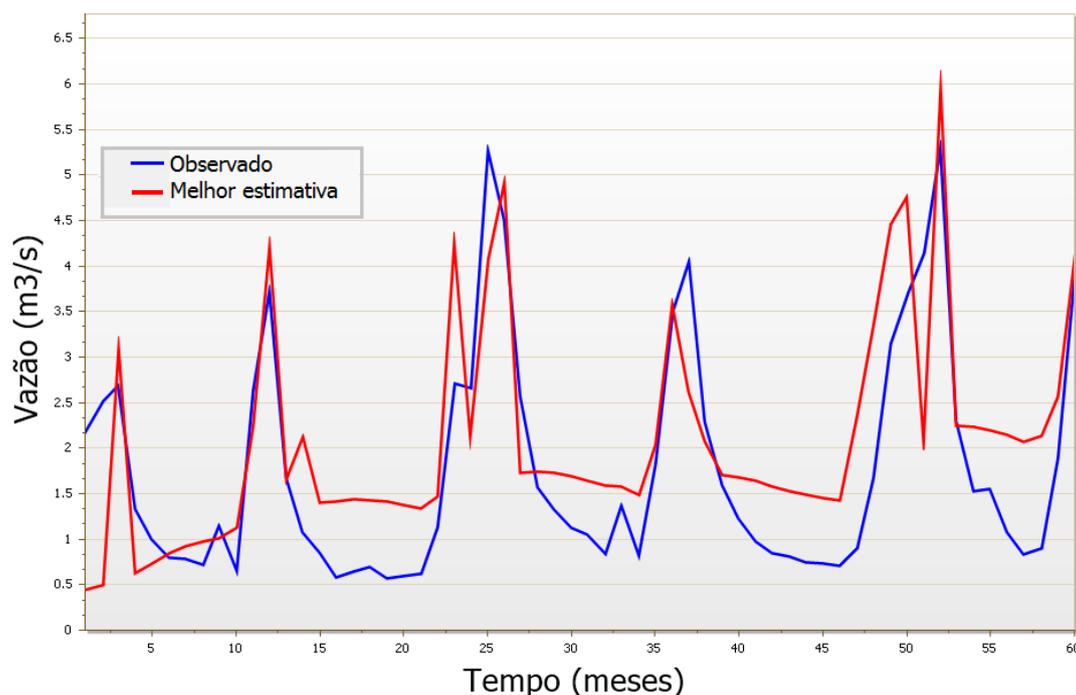


Figura 4. Comparação dos dados de vazão observados e simulados no período de calibração para a bacia do Rio Itamarandiba do Campo.

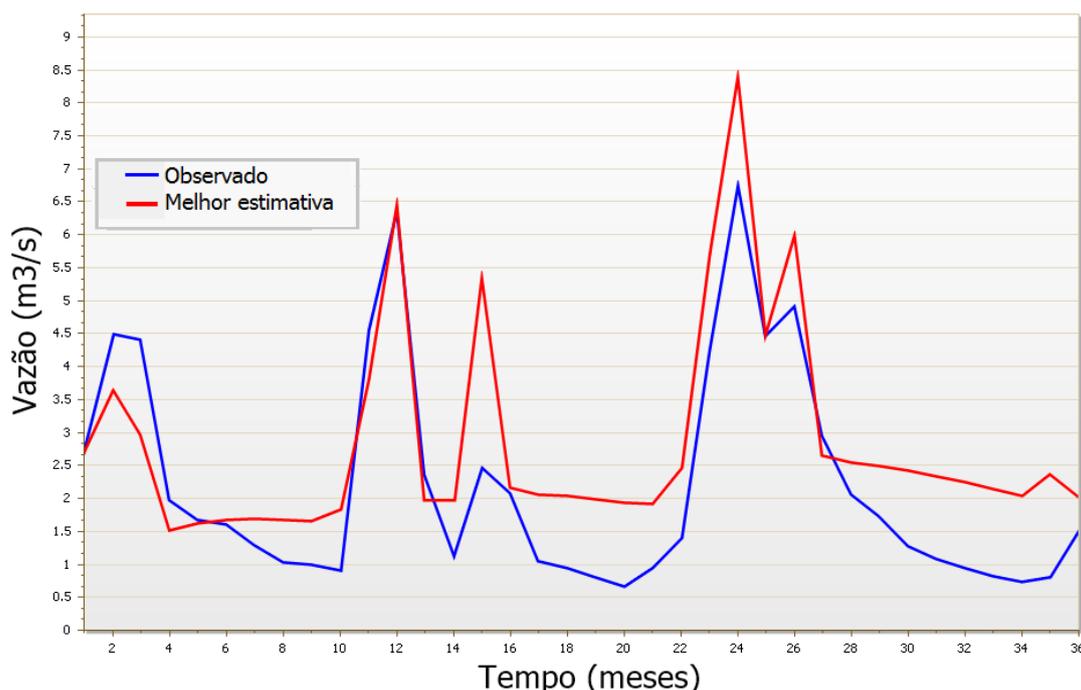


Figura 5. Comparação dos dados de vazão observados e simulados no período de validação para a bacia do Rio Itamarandiba do Campo.

A análise da Figura 3 corrobora com a interpretação dos coeficientes calculados para a simulação inicial. Observa-se que não houve adaptação à dinâmica da bacia, com todos os valores superestimados nos picos e subestimados nas vazões mínimas. Após o ajuste, os valores estimados acompanharam satisfatoriamente o padrão geral dos dados, identificando de forma mais adequada picos e rebaixamentos na distribuição da vazão (Figuras 4 e 5). Contudo, observa-se uma tendência de superestimação das vazões mínimas, embora de baixa magnitude, tanto nos resultados da calibração quanto na validação, com uma diferença de até 1,5 m³/s entre a vazão estimada e a observada. Na validação, é possível perceber, a partir do 14º mês avaliado, uma superestimação da variável em três picos de vazão, o que pode explicar o valor, ainda elevado, do PBIAS nessa etapa.

Os resultados indicam a necessidade de aprimoramento do uso do modelo para a região, buscando principalmente uma melhor representatividade das vazões mínimas, visto que a superestimação dessa variável pode acarretar comprometimento ambiental e conflitos de uso (Falco *et al.*, 2015). Para isso, diferentes parâmetros utilizados em bacias do cerrado brasileiro podem ser empregados (Carvalho, 2014). Além disso, um maior número de iterações na calibração pode aperfeiçoar o ajuste do modelo, diminuindo o intervalo dos parâmetros e, portanto, a incerteza da estimativa (Abbaspour, 2015).

O grande número de informações necessárias para descrever a variabilidade das bacias hidrográficas, assim como a dificuldade de obtenção de dados na qualidade exigida pelo SWAT, ainda limita a utilização desse modelo no Brasil (Pessoa *et al.* 1997; Bressiani, 2015). Destaca-se a falta de mapas detalhados de solos e a dificuldade na obtenção de séries históricas suficientemente longas e sem falhas de dados meteorológicos e hidrológicos. Apesar dessas limitações, o modelo demonstrou potencial para auxílio na tomada de decisão, ao representar adequadamente o comportamento hídrico sazonal e as vazões em meses de maior disponibilidade hídrica.

4. Conclusão

A calibração e a validação do modelo SWAT geraram resultados satisfatórios para a estimativa da vazão na sub-bacia hidrográfica estudada, com uma melhoria considerável do

ajuste em relação à simulação inicial. Embora tenham sido detectadas limitações nos dados de entrada disponíveis, os resultados obtidos indicam o potencial de uso do modelo SWAT e do SWAT-CUP para a gestão dos recursos hídricos na região, através de previsão de vazões considerando cenários de intervenções antrópicas. Para aperfeiçoamento do modelo deve ser avaliada a influência de outros parâmetros, bem como de um maior número de iterações na calibração.

Referências Bibliográficas

Abbaspour, K.C. *et al.* Modelling hydrology and water quality in the prealpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 333, p. 413-430. 2007.

Abbaspour, K.C. **SWAT-CUP: SWAT calibration and uncertainty programs – A User Manual**. Duebendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, 2015. 100 p.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Hidroweb** – Sistema de Informações Hidrológicas. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. 2015. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em: 22 set. 2016.

Arnold, J. G. *et al.* SWAT: Model use calibration and validation. **ASABE - American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 55, p. 1494-1508. 2012a.

Arnold, J. G. *et al.* **Soil and Water Assessment Tool - Input/Output Documentation: Version 2012**. Texas Water Resources Institute. Technical Report n. 439, 650 p. 2012b.

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**, v. 34, n. 1, p. 73–89. 1998.

Barros, F. G. N.; Amin, M. M. Água: um bem econômico de valor para o Brasil e o mundo. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 4, n. 1., p. 75-108. 2008

Begou, J. C. *et al.* Multi-Site Validation of the SWAT Model on the Bani Catchment: Model Performance and Predictive Uncertainty. **Water**, v. 8, 23 p. 2016.

Bressiani, D. A. *et al.* Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, 2015.

Brighenti, T. M.; Bonumá, N. B.; Chaffe, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica Catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n.1., p. 53 – 64. 2016

Carvalho, F. H. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Brasília, Universidade de Brasília, 154 p., 2014.

Dantas, J. C. *et al.* Simulação vazão-erosão usando o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da Paraíba. São Paulo, UNESP. **Geociências**, v. 34, n. 4, p. 816-827, 2015.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Mapa de Solos do Brasil**. Escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/amb_data/Shapefiles/soloEmbrapa.zip>. Acesso em: 26 ago. 2016.

Falco, A. L.; Ide, C. N.; Almeida, I. K.; Ribeiro, M. L.; Ide, W. R. Disponibilidade hídrica para outorga: influência da sazonalidade. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 21, 2015, Brasília. Segurança hídrica e desenvolvimento sustentável: desafios do conhecimento e da gestão. **Anais...** Brasília, DF: ABRH, 2015. Disponível em: <http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-836_disponibilidade-hidrica-para-outorga-influencia-da-sazonalidade>. Acesso em: 05 nov. 2016

Fan, F. M.; Buarque, D. C.; Pontes, P. R. M.; Collischonn, W. Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 21, 2015, Brasília. Segurança hídrica e

desenvolvimento sustentável: desafios do conhecimento e da gestão. **Anais...** Brasília, DF: ABRH, 2015. Disponível em: <http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-351_um-mapa-de-unidades-de-resposta-hidrologia-para-a-america-do-sul>. Acesso em: 04 nov. 2016.

Ferreira, V. O.; Silva, M. M. O clima da bacia do Rio Jequitinhonha, em Minas Gerais: subsídios para a gestão de recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, p. 302–319, 2012.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **BDMEP** - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. 2014. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 19 set. 2016.

Jesus, G. L. *et al.* Doses e fontes de nitrogênio na produtividade do eucalipto e nas frações da matéria orgânica em solo da região do cerrado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 201-214. 2012.

Köppen, W.; Geiger, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928.

Lelis, T.A.; Calijuri, M.L.; Fonseca, A. 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, p. 623-634, 2012.

Marengo, J. A. *et al.* **Riscos das mudanças climáticas no Brasil**: análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia. São Paulo: Inpe; Londres: MetOffice, 2011.

Medeiros, I. C.; Silva R. M. Análise da erosão hídrica na região semiárida da Paraíba usando o modelo SWAT acoplado a um SIG. **Geociências**, v. 33, n. 3, p.457-471, 2014.

Moriassi, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **ASABE** - American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290. 1970.

Norato, H. G. N.; Duarte, A. R. Uma proposta para a detecção do adequado período de aquecimento em modelos de simulação. **GEPROS** - Gestão da Produção, Operações e Sistemas, v. 6, n. 4, p. 11-26. 2011.

Olivera, F. *et al.* ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS Interface for SWAT. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 2, p. 295-309. 2006.

Pessoa, M.C.P.Y.; Luchiari, A. J.; Fernandes, E. N.; Lima, M. A. **Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas**. Jaguariúna, EMBRAPA/CNPMA. 1997. 83p.

Silva, M. M.; Ferreira, V. O. Análise comparativa do clima de Araçuaí, Pedra Azul e Itamarandiba, na porção mineira da bacia do Rio Jequitinhonha. **Caderno de Geografia**, v. 21, n. 35, p. 56-73. 2011.

Tucci, C.E. M.; Clarke, R.T. Impacto das Mudanças da Cobertura Vegetal no Escoamento: Revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n.1, p. 135-152. 1997.

USGS – United States Geological Survey . **Landsat Archive**. L8 OLI/TIRS. 2015b. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em 26 ago. 2016.

USGS – United States Geological Survey. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global**. 2015a. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em 26 ago. 2016.