

Calibração do modelo hidrológico SWAT para estimativa da vazão em sub-bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha

Nathalia Drummond Marques da Silva

Graduanda em Engenharia Florestal

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Cristiano Christofaro

Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Florestal

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Resumo

A necessidade de simular o efeito das ações antrópicas em bacias hidrográficas tem estimulado o uso de modelos hidrológicos. Dentre os modelos aplicáveis destaca-se o SWAT (Soil and Water Assessment Tool) com ampla utilização mundial. A obtenção de estimativas representativas pelos modelos hidrológicos requer a calibração dos processos específicos de cada bacia. Para simular a resposta da vazão de uma sub-bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha (Rio Itamarandiba do Campo) a variáveis climáticas, edáficas e de manejo do solo, o modelo hidrológico SWAT foi calibrado e validado no programa SWAT-CUP, considerando dados de vazões mensais obtidos de 1997 a 2007. A calibração e validação atingiram, respectivamente, valores de 0,53 e 0,60 considerando o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, e 0,62 e 0,75 para o coeficiente de determinação. Os valores estimados acompanharam satisfatoriamente o padrão geral dos dados observados, demonstrando a aplicabilidade do modelo na gestão dos recursos hídricos da região.

Palavras-chave: SWAT, modelagem hidrológica, simulação, recursos hídricos.

Abstract:

The need to simulate the effect of human activities in watersheds has stimulated the use of hydrologic models. Among the applicable models, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) has been widely used worldwide. The attainment of representative estimates requires calibration of hydrological models to the specific processes of the watershed. To simulate the flow response of Jequitinhonha River sub-basin (Itamarandiba do Campo River) to climatic variables, soil and soil management, the hydrological model SWAT was calibrated and validated in SWAT-CUP program, considering monthly data flow obtained from 1997 to 2007. Calibration and validation reached, values of 0.53 and 0.60 respectively considering the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, and 0.62 and 0.75 for the coefficient of determination. The estimated values satisfactorily followed the general pattern of the observed data, demonstrating the applicability of the model in water resources management in the region.

Key-Words: SWAT, hydrologic modeling, simulation, water resources

nathalia.florestal@yahoo.com.br
cristiano.christofaro@ufvjm.edu.br

Introdução

A essencialidade da água para a população é reconhecida no Brasil desde a Lei nº 9.433 de 1997 (BRASIL, 1997), que institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos. Apesar de sua notável importância, pressões humanas diretas sobre a biosfera (IGBP, 1993) têm produzido cenários cada vez mais alarmantes de escassez de recursos hídricos, que podem afetar a dinâmica hidrológica regional.

A dificuldade em simular o efeito das ações antrópicas em bacias hidrográficas tem estimulado o uso de modelos hidrológicos como o SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (ARNOLD et al., 1998) em todo o mundo. Essa dificuldade está relacionada à grande heterogeneidade dos sistemas envolvidos (TUCCI; CLARKE, 1997), sendo necessário adequar os modelos aos processos específicos de cada bacia. Assim, os modelos devem passar por uma etapa de calibração, na qual parâmetros selecionados são ajustados a partir da comparação com dados medidos em campo (BRIGHENTI et al., 2016). Com o modelo ajustado às condições da bacia, executa-se a validação do componente de interesse (e. g. vazão) a fim de comprovar sua aptidão, na qual os valores dos parâmetros obtidos na calibração são aplicados a uma série diferente da utilizada neste procedimento (ARNOLD et al., 2012a). Segundo Lelis et al., (2012), os resultados dessa etapa indicam se o modelo é capaz de reproduzir adequadamente a série de dados não usados em sua calibração.

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.

Metodologia de trabalho

Área de estudo

A área de estudo está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha, sendo 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. Totaliza uma área de 15.270,81 hectares, correspondendo a 5,58% do município de Itamarandiba (Figura 1) .

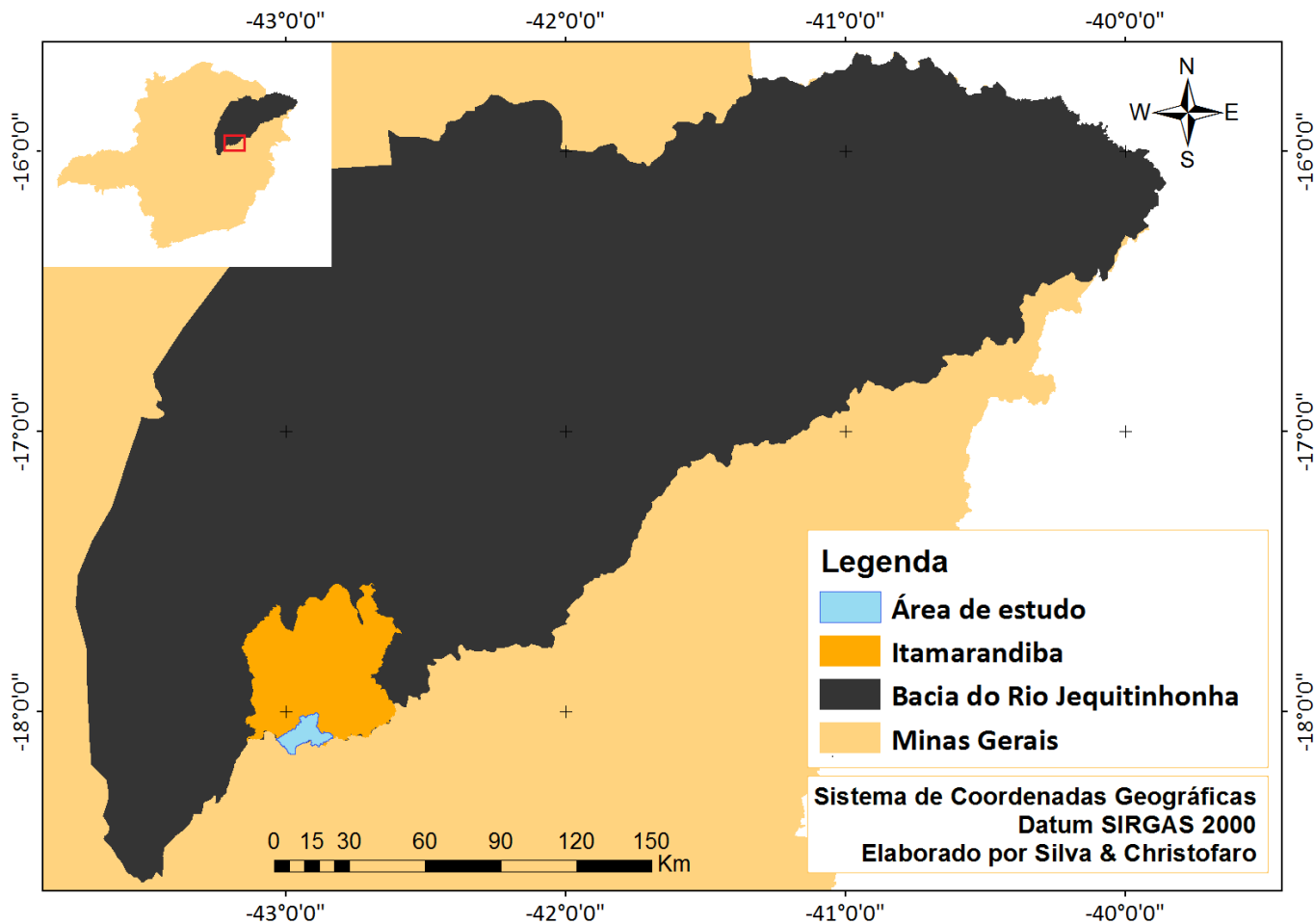


Figura 1. Área de Estudo

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; 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, porém incluindo consideráveis manchas de florestas estacionais (FERREIRA; SILVA, 2012).

Modelagem, calibração e validação

O modelo SWAT percorre várias etapas até a simulação hidrológica, incluindo o pré-processamento dos dados, e sua inserção no modelo. A Figura 2 ilustra de forma resumida as etapas mais importantes a serem executadas.

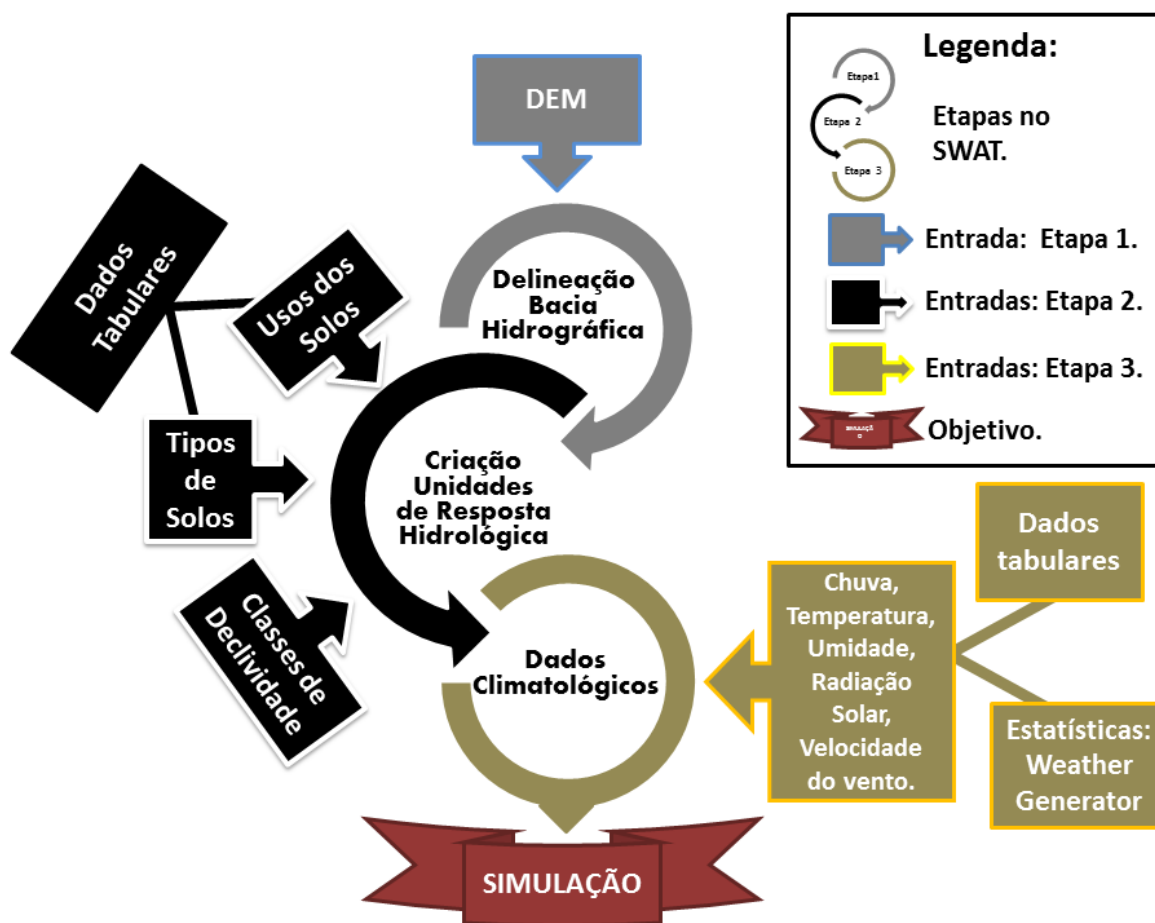


Figura 2. Etapas do modelo SWAT

Os dados de entrada incluem: modelos digitais de elevação (DEM); uso e ocupação do solo; tipos de solos; declividade; e variáveis climáticas (temperatura, pluviosidade, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento). Baseado na topografia, representada pelos DEMs, o modelo delimita a bacia hidrográfica, subdividindo-a em sub-bacias em um primeiro nível. Em segundo nível, cada sub-bacia é então subdividida em porções homogêneas quanto à declividade, tipo e uso do solo. Essas áreas são denominadas unidades de resposta hidrológica (HRU), utilizadas pelo modelo para calcular a maioria dos componentes simulados, uma vez que, ao agrupar áreas similares em uma única HRU, simplificam o processamento (ARNOLD et al., 2012b). 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, localizada no exutório da área de estudo (ANA, 2015). Os três primeiros anos do intervalo de simulação 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; 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). Dez parâmetros foram escolhidos para calibração, devido ao seu potencial de influência no escoamento superficial (VEIGA, 2014). 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 por dois indicadores: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) (NASH; SUTCLIFFE, 1970) e o coeficiente de determinação (R²), os quais comparam a vazão observada com a vazão estimada após a calibração dos parâmetros. A classificação dos ajustes obtidos pelo COE seguiu os critérios propostos por Moriasi et al. (2007), dispostos na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação do desempenho da calibração de acordo com o valor do COE:

Valor	Classificação
COE ≤ 0,5	Não satisfatório
0,50 < COE ≤ 0,65	Satisfatório
0,65 < COE ≤ 0,75	Bom
0,75 < COE ≤ 1,00	Muito bom

Já para a função objetivo R², valores acima de 0,5 foram considerados aceitáveis (MORIASI et al., 2007). Após alcançados valores satisfatórios para as funções objetivo na calibração, os intervalos dos parâmetros calibrados foram utilizados na validação do modelo. Nessa etapa os três últimos anos de dados, de 2005 a 2007, foram utilizados. A avaliação da validação seguiu os mesmos critérios definidos para a calibração.

Resultados e discussão

A determinação dos parâmetros a serem utilizados foi feita fundamentada em revisão bibliográfica (BEGOU et al., 2016; DANTAS et al., 2015; LELIS et al., 2012). Os parâmetros foram alterados selecionando-se o método de multiplicação para aqueles relacionados ao solo, visto que estes não são espacialmente homogêneos, e apresentam diferentes valores ao longo da bacia. Assim, cada valor é alterado de forma proporcional em relação ao valor inicial (CARVALHO, 2014). Para os demais parâmetros, utilizou-se o método de substituição de valores. Na tabela 2 constam a descrição e a faixa de valores obtida para cada parâmetro.

Tabela 1. Classificação do desempenho da calibração de acordo com o valor do COE:

Parâmetros	Descrição	Método de alteração	Valor mínimo	Valor máximo
CN2	Valor da curva número para a condição média de umidade do solo	Multiplicação	-0,486459	-0,368385
SOL_Z	Profundidade da camada de solo	Multiplicação	0,272812	0,291988
SOL_BD	Densidade aparente do solo	Multiplicação	-0,160807	-0,132461
SOL_AWC	Capacidade de armazenamento de água no solo	Multiplicação	0,745969	0,812127
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo	Multiplicação	1,810276	1,883522
ESCO	Fator de compensação da evaporação da água do solo	Substituição	0,051813	0,126213
RCHRG_DP	Fração de percolação para o aquífero profundo	Substituição	0,456115	0,546751
ALPHA_BF	Fator alfa de recessão do fluxo de base	Substituição	0,000000	0,022211
GW_DELAY	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal	Substituição	41,176380	51,837498
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal	Substituição	102,518867	123,073677

Para a calibração, a aplicação dos intervalos apontados resultou em 78 simulações plausíveis, dentre as 500 simulações executadas na última iteração, atingindo COE=0,53 e R2=0,62 para a melhor estimativa. Na etapa de validação, o mesmo intervalo aplicado alcançou um total de 337 simulações satisfatórias, e obteve-se COE=0,60 e R2=0,75 para a melhor estimativa. Assim, embora não tenha sido atingida a excelência do ajuste, esta foi efetiva, uma vez que os coeficientes atingiram valores considerados satisfatórios, segundo os critérios de avaliação adotados.

As Figuras 3 e 4 demonstram a distribuição dos dados observados e daqueles correspondentes à melhor simulação de vazão, sendo a Figura 3 correspondente aos 60 meses utilizados na calibração, entre janeiro de 2000 e dezembro de 2004, e a Figura 4, aos 36 meses utilizados na validação, entre janeiro de 2005 e dezembro de 2007.

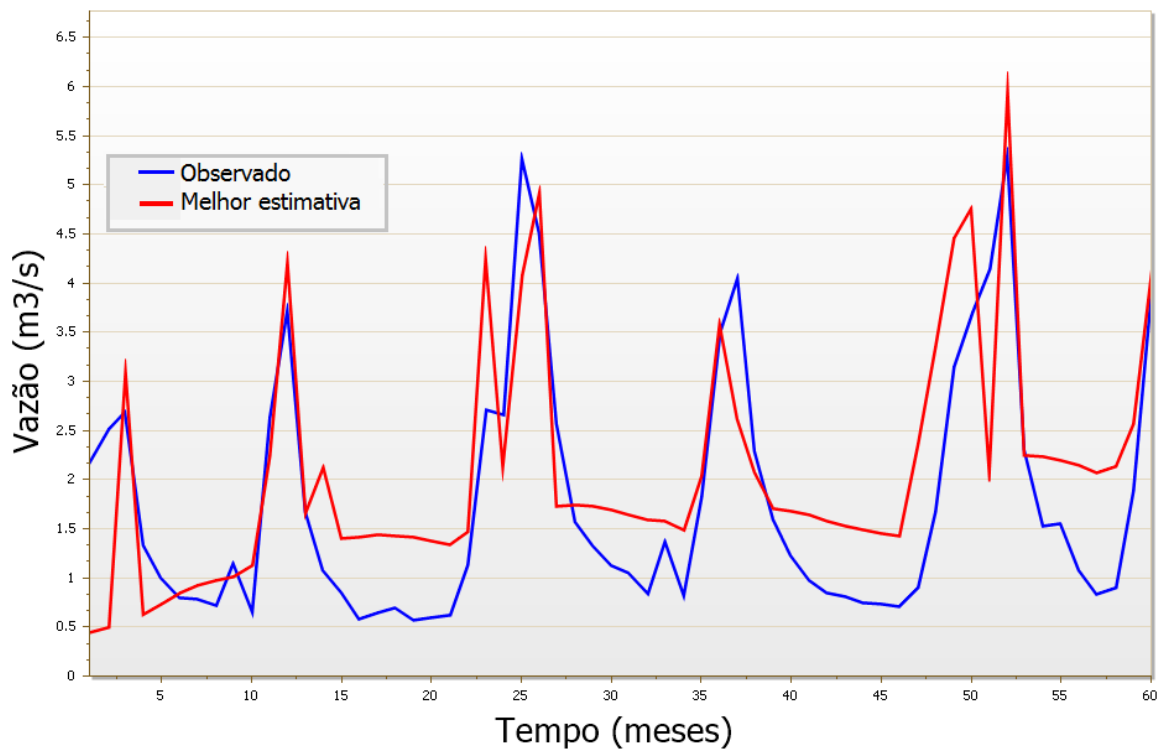


Figura 3. Comportamento dos dados de vazão observados e simulados no período de calibração para a sub-bacia do rio Itamarandiba do Campo.

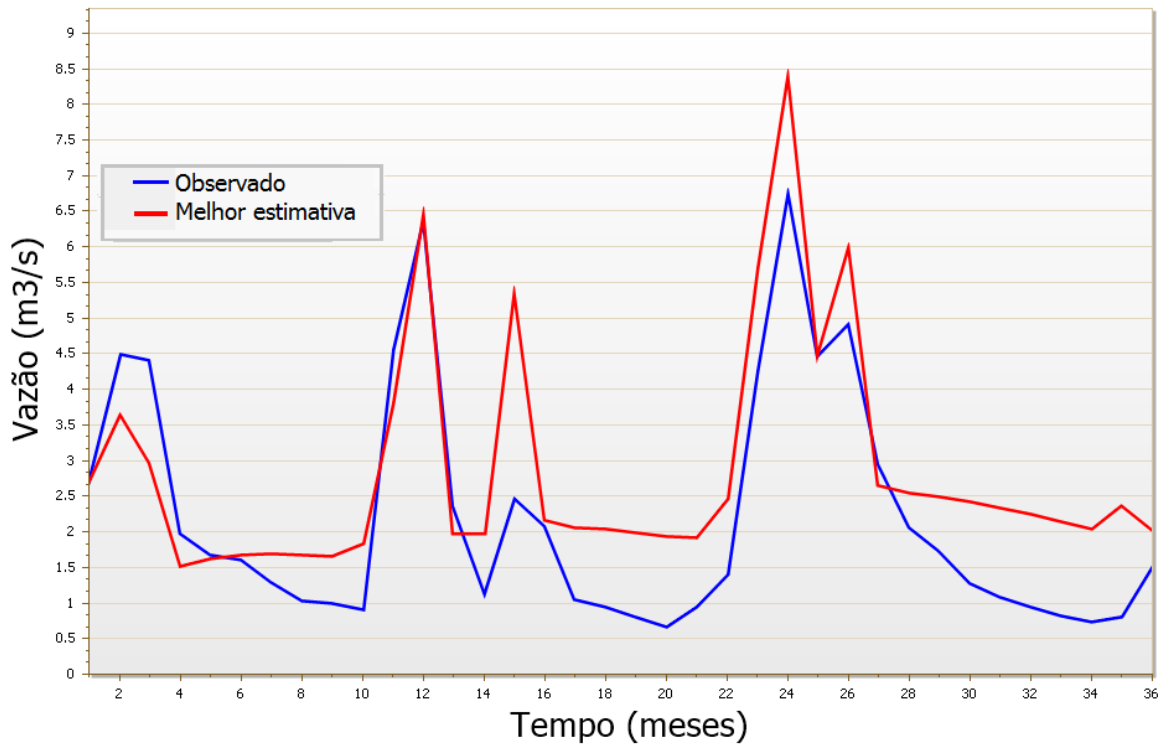


Figura 4. Comportamento dos dados de vazão observados e simulados no período de validação para a sub-bacia do rio Itamarandiba do Campo.

De acordo com as Figuras 3 e 4, os valores estimados acompanharam satisfatoriamente o padrão geral dos dados, identificando de forma correta os picos e rebaixamentos na distribuição da vazão. Apesar disso, observa-se uma tendência de superestimação das vazões mínimas, tanto na calibração quanto na validação. Nesta última, é possível perceber ainda, a partir do 14º mês avaliado uma superestimação da variável em três picos de vazão.

Assim, verifica-se ainda ser necessário aprimorar o 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, tais como o coeficiente de retardo do escoamento superficial (SURLAG), a quantidade de água inicial no aquífero raso (SHALLST), o coeficiente de rugosidade de Manning para o canal principal (CH_N2), a profundidade da água subterrânea necessária para ocorrer fluxo de retorno (GWQMN), a altura inicial do aquífero (GWHT), e o coeficiente de ascensão de água à zona de saturação (GW_REVAP) (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 (BRESSIANI et al., 2015; PESSOA et al., 1997). 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.

Conclusão

A calibração e a validação do modelo SWAT geraram resultados satisfatórios para a estimativa da vazão na sub-bacia hidrográfica estudada. Assim, 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 trabalhos futuros sugere-se a aplicação de diferentes parâmetros e um maior número de iterações na calibração, a fim de aperfeiçoar o ajuste do modelo.

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.
- 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. 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.
- 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. et al. SWAT: Model use calibration and validation. ASABE - American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 55, p. 1494-1508. 2012a.
- 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.
- BRASIL. Lei nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. *Diário Oficial [da] União, Brasília, DF, 09 jan. 1997. Seção 1, p. 470. 1997.*
- 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, Beijing*, 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. Porto Alegre 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.
- FALCO, A. L. et al. 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.*
- 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.
- IGBP – International Geosphere-Biosphere Programme. Biospheric aspects of the hydrological cycle. The International Geosphere-Biosphere Programme: a study of global change, Report n.27. Estocolmo, 103p. 1993.
- 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.; CALJJURI, 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.
- MORIASI, 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.
- PESSOA, M. C. P. Y. et al. Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas. *Jaguariúna, EMBRAPA/CNPMA*. 83p. 1997.
- 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. Belo Horizonte*: 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, Porto Alegre*, v.2, n.1, p. 135-152. 1997.
- VEIGA, A. M.. Calibração do modelo hidrossedimentológico SWAT na bacia hidrográfica do Córrego Samambaia. *Goiânia-GO. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente)- Universidade Federal de Goiás, Goiânia*, 2014.