

AValiação DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS NA CALIBRAÇÃO AUTOMATIZADA DO MODELO SWAT

Sara Ferrigo^{1}, Ricardo Minoti¹, Henrique Roig² & Sergio Koide¹*

Resumo – A modelagem do sistema hidrológico é fundamental para qualquer programa de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, portanto, é de suma importância que os modelos desenvolvidos sejam submetidos a um criterioso processo de calibração e, posteriormente, de análise de incertezas, para a obtenção de melhores resultados. O modelo SWAT vem sendo amplamente utilizado em pesquisas realizadas em diferentes regiões brasileiras, principalmente em função de sua eficiência e aplicabilidade. O presente estudo teve como objetivo principal analisar as respostas obtidas por quatro diferentes métodos de análise multiobjetivo e multicritério para a calibração do modelo SWAT com base na aplicação da ferramenta SWAT-CUP. O estudo preliminar demonstrou que houve uma diferença significativa nos resultados obtidos. O método GLUE apresentou os melhores resultados para as funções objetivo na calibração, com aumento considerável do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe quando comparado com os demais métodos. Os resultados evidenciaram a importância de um melhor entendimento sobre a eficiência de cada método de calibração na obtenção de melhores resultados frente às bacias simuladas.

Palavras-Chave – SWAT, CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA, SWAT-CUP.

ASSESSMENT OF THE USE OF DIFFERENT METHODS FOR THE SWAT MODEL AUTOMATIC CALIBRATION

Abstract – The hydrological system modeling is critical for any water resources planning and management program, it is therefore of paramount importance that these models undergo a careful calibration and uncertainty analysis to obtain better results. The SWAT model has been widely used in researches conducted in different regions of Brazil, mainly due to its efficiency and applicability. This study aimed to analyze the responses obtained from four different multi-objective analysis methods for the SWAT model calibration based on the application of the SWAT-CUP tool. The preliminary study showed that there was significant difference in the obtained results. The GLUE method showed the best results for the objective functions in calibration, reaching a considerable increase of Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, when compared to the other methods. The results demonstrated the importance of a better understanding about each calibration method efficiency to obtain the best results in the simulated basins.

Keywords – SWAT, Automatic calibration, SWAT-CUP.

¹Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília

² Instituto de Geociência, Universidade de Brasília

INTRODUÇÃO

Modelos hidrológicos vêm sendo amplamente aplicados na pesquisa e no gerenciamento associados aos recursos hídricos. As simulações têm sido realizadas para diversos fins, tais como gestão integrada de bacias hidrográficas, avaliação da eficácia de manejos para redução da perda de solo e poluição difusa, previsão e identificação da erosão e sedimentação, avaliação do efeito das mudanças de uso e manejo do solo, previsão de fluxos e vazões de pico, avaliação do impacto das mudanças climáticas e avaliação da disponibilidade e qualidade da água.

Dentre variados programas computacionais utilizados na modelagem de bacias hidrográficas tem-se o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), desenvolvido pelo *Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture* (ARS/USDA). O modelo possibilita a análise dos efeitos decorrentes de diferentes usos e manejo do solo, especialmente no que concerne a bacias hidrográficas rurais (Neitsch *et al.* 2005). Segundo uma revisão realizada por Garbossa *et al.* (2011) sobre os estudos realizados com o SWAT no Brasil, o modelo tem sido utilizado em diversos estudos acadêmicos nas distintas regiões brasileiras e os resultados desses trabalhos mostraram seu elevado potencial de aplicação no Brasil como uma ferramenta de apoio à decisão para comitês de bacias hidrográficas e instituições governamentais ligadas ao meio ambiente e recursos hídricos.

A modelagem de bacias hidrográficas é extremamente importante para qualquer programa de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos. No entanto, para que os resultados gerados possam ser utilizados com maior confiança pelos diferentes níveis de tomada de decisão, torna-se fundamental que o processo de modelagem seja realizado de maneira criteriosa. Os modelos devem ser eficientemente calibrados e posteriormente submetidos à análise de incerteza para que, dessa forma, se tenham garantias de que os resultados sejam coerentes.

De acordo com os resultados obtidos por Yang *et al.* (2008) e Setegn *et al.* (2008) que aplicaram o SWAT para estudos em bacias hidrográficas da China e da Etiópia, implementando diferentes técnicas multicritérios e multiobjetivo na calibração, validação e análise de incerteza e sensibilidade do modelo, verificou-se a necessidade de análises comparativas dos métodos para as distintas aplicações visto que foram encontradas diferenças nos resultados quando implementados pelos autores.

O SWAT-CUP possui rápido processamento e possibilita a escolha de cinco diferentes métodos, (1) *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE), (2) *Parameter Solution* (ParaSol), (3) *Sequential Uncertainty Fitting algorithm* (SUFI-2), (4) *Markov chain e Monte Carlo* (MCMC) e (5) *Particle Swarm Optimization* (PSO) que possibilitam a realização das análises de sensibilidade e incerteza, calibração, e verificação do modelo SWAT (Abbaspour *et al.* 2007).

O objetivo deste estudo foi analisar as diferenças obtidas nos resultados das análises de sensibilidade e incertezas e principalmente da calibração do modelo SWAT pela aplicação de quatro diferentes métodos multicritério e multiobjectivo através do emprego da ferramenta SWAT-CUP na bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido no Distrito Federal.

METODOLOGIA

O modelo SWAT foi aplicado para a bacia do córrego Capão Comprido, localizada no Distrito Federal (DF) (Figura 1). A bacia apresenta uma área de drenagem de 16,6 km² e deságua no Lago Descoberto, o mais importante manancial do DF.

A simulação foi realizada com dados climáticos de 1988 a 2008, disponibilizados pelo INMET e pela CAESB, sendo que os três primeiros anos foram utilizados para o aquecimento do modelo e os dados mensais de vazão, disponibilizados pela CAESB, dos anos de 2000 a 2005 foram

utilizados para a calibração e para as análises de incerteza e sensibilidade realizada pelo SWAT-CUP.

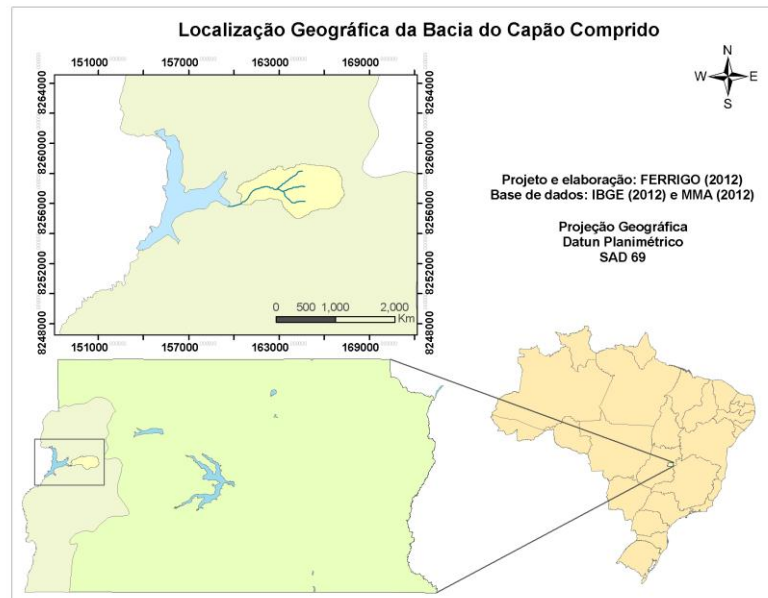


Figura 1. Localização geográfica da Bacia do Córrego Capão Comprido – DF.

Os métodos de análise multicritério e multiobjetivo utilizados na análise comparativa dos resultados foram o SUFI-2, GLUE, PARASOL e PSO, brevemente descritos a seguir.

SUFI2 - Sequential Uncertainty Fitting: No SUFI-2 levam-se em conta para a análise de incerteza todas as suas fontes, como a incerteza em variáveis de entrada, o conceitual do modelo e as incertezas nos parâmetros e nos dados medidos. O grau para o qual todas as incertezas são contabilizadas é quantificado por uma medida referida como o fator-p, que é a percentagem dos dados medidos delimitadas pela incerteza de predição de 95% (95PPU). Outra medida que busca quantificar a eficácia de uma análise de calibração e incerteza é o fator-r, que é a espessura média da banda 95PPU dividida pelo desvio padrão dos dados medidos (Abbaspour *et al.* 2011).

GLUE - Generalised Likelihood Uncertainty Estimation: A metodologia GLUE é um procedimento de calibração fundamentado na tese da equifinalidade que permite a análise de incertezas. No método GLUE há o reconhecimento da equivalência de diferentes conjuntos de valores dos parâmetros na calibração de modelos distribuídos. O procedimento é baseado em inúmeras simulações em que são usados diferentes conjuntos de valores de parâmetros escolhidos aleatoriamente a partir de distribuições de probabilidades específicas (Beven e Binley, 1992).

PARASOL - Parameter Solutions: O algoritmo PARASOL utiliza um método de otimização e de cálculo estatístico que determina a incerteza paramétrica de modelos complexos (van Griensven *et al.* 2006). Na otimização o algoritmo PARASOL minimiza a função objetivo usando o algoritmo SCE-UA e desenvolve a análise de incertezas provendo duas possíveis abordagens estatísticas: o Método do X^2 e o Método bayesiano. O algoritmo *SCE - Shuffled Complex Evolution* (Duan *et al.* 1994) é uma ferramenta de otimização global que combina a técnica de Algoritmos Genéticos com a técnica *Hill-Climbing*.

PSO - Particle Swarm Optimization: Kennedy e Eberhart (1995) propuseram um algoritmo conhecido como colônia de partículas que consiste em um método de simulação baseado no comportamento social de grupos. Assim como em outros métodos de otimização natural, o PSO trabalha com populações de soluções, em que numa mesma iteração, vários pontos do espaço de busca são avaliados através de uma função de aptidão. Diferentemente dos Algoritmos Genéticos,

em que os indivíduos só possuem informações acerca da população atual, no PSO os indivíduos aprendem com suas experiências passadas, o que representa uma vantagem dessa metodologia (Nascimento *et al.*, 2009).

Os dados de entrada utilizados, baseados em uma simulação completa do modelo SWAT para a bacia do córrego Capão Comprido (DF), foram os mesmos para as quatro análises. Os intervalos definidos para os 10 parâmetros selecionados para análise e suas descrições estão apresentados Tabela 1. Foram realizadas 20 simulações para cada análise.

Como os valores iniciais dos parâmetros CN2, SOL_AWC e SOL_K, são determinados a partir das características da bacia informadas nos mapas temáticos inseridos ao rodar o modelo, foi indicado o método de multiplicação por valores dentro do intervalo estabelecido para o ajuste necessário, ou seja, o valor inicial do parâmetro foi ajustado com base em alterações percentuais. O CN2, por exemplo, pôde ser diminuído em 20% (-0,2) ou aumentado em 20% (0,2). Para os demais parâmetros foram indicados o método de igualar a um valor que oferecesse o melhor ajuste dentro do intervalo estabelecido.

Tabela 1. Descrição dos parâmetros e intervalo estabelecido para a aplicação de cada método na análise.

<i>Parâmetro</i>	<i>Função</i>	<i>Método</i>	<i>Intervalo</i>	
CN2	Cálculo do volume de escoamento superficial	Multiplicar	-0,2	0,2
ALPHA_BF	Constante de recessão para o fluxo de base	Igualar	0,0	1,0
GW_DELAY	Intervalo de tempo para a recarga ao aquífero	Igualar	30	450
GWQMN	Profundidade limite do nível de água do aquífero	Igualar	0,0	2,0
GW_REVAP	Cálculo da quantidade de água que se move no solo	Igualar	0,0	0,2
ESCO	Cálculo da demanda de evaporação do solo	Igualar	0,8	1,0
SOL_AWC	É a capacidade de água disponível na camada de solo	Multiplicar	-0,05	0,05
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada	Multiplicar	0,8	0,8
SHALLST	Profundidade inicial do aquífero raso	Igualar	2000	5000
GWHT	Altura inicial da água subterrânea	Igualar	4	10

As comparações realizadas entre os resultados obtidos para cada método de análise multiobjectivo foram em relação à: análise de incertezas, levando em consideração o intervalo obtido dos valores e o fator-p e o fator-r; análise de sensibilidade, comparando os parâmetros mais sensíveis; e à calibração, referente aos resultados obtidos das funções objetivo, no caso, coeficiente Nash e Sutcliffe (NS), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de determinação multiplicado pelo coeficiente de regressão linear (br^2), média do método do quadrado do erro (MSE) e soma dos quadrados dos resíduos (SSQR).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Melhor estimativa dos parâmetros

Os valores dos parâmetros decorrentes de cada método que resultaram nos melhores ajustes dentro dos intervalos estabelecidos estão descritos na Figura 2.

Pode-se notar que a diferença entre os valores usados para o parâmetro CN2 foi bastante expressiva quando confrontados, principalmente entre o SUFI-2 e os demais métodos. Quando comparados os métodos SUFI-2 e o PARASOL a diferença foi equivalente a 563%. Entretanto, essa análise comparativa entre os demais métodos é bem menor. Outros parâmetros que também apresentaram variação significativa foram o SOL_AWC e o SOL_K.

O parâmetro que apresentou menor variação foi o ESCO, com apenas 1% quando comparados os métodos SUFI-2 e GLUE e até 11% na comparação do SUFI-2 com o PARASOL.

Parâmetro	Valor			
	SUFI-2	GLUE	ParaSol	PSO
r_CN2.mgt	-0.03	-0.126261	-0.199	-0.171
v_ALPHA_BF.gw	0.825	0.99118	0.526	0.460
v_GW_DELAY.gw	208.5	270.945	129.350	243.007
v_GWQMN.gw	1.75	1.27552	1.174	0.616
v_GW_REVAP.gw	0.045	0.118972	0.052	0.059
v_ESCO.hru	0.915	0.903049	0.813	0.879
r_SOL_AWC(1).sol	0.0175	-0.0169306	0.049	0.021
r_SOL_K(1).sol	-0.76	-0.165212	0.223	-0.373
v_SHALLST.gw	2225	4651.9	4249.300	1893.381
v_GWHT.gw	7.45	8.62891	7.104	4.649

Figura 2. Melhor estimativa dos parâmetros para cada método aplicado.

Nota-se que o CN2 foi diminuído em todos os métodos analisados para a obtenção de um ajuste admissível, enquanto o SOL_AWC foi aumentado, e o SOL_K foi diminuído em todos os métodos, exceto no PARASOL.

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade dos parâmetros na aplicação do modelo, apresentada na Figura , foi significativamente distinta para os quatro métodos. Porém se pode observar que os parâmetros atrelados à água subterrânea mostraram maior sensibilidade em todas as análises.

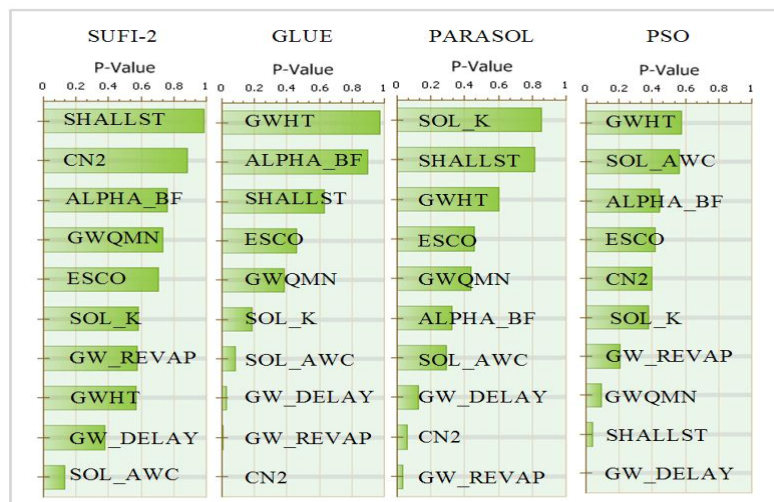


Figura 3. Resultado da análise de sensibilidade para os diferentes métodos

O valor de P (*P-Value*) determina a significância da sensibilidade onde valores próximos de zero apresentam maior significância (Abbaspour *et al.* 2011), ou seja, no método SUFI-2 o parâmetro SOL_AWC, que representa a capacidade de água disponível na primeira camada do solo, foi o parâmetro de maior significância para a modelagem, enquanto o CN2, que é o parâmetro Curva Número na condição II de umidade do solo e é importante no cálculo do volume de escoamento superficial, seguido do parâmetro GW_REVAP, com praticamente mesma influência, apresentaram-se como mais sensíveis nos resultados finais quando o método GLUE foi aplicado. De forma similar ao método GLUE, os quatro parâmetros que apresentaram maior significância no

método PARASOL, foram o GW_REVAP, CN2, GW_DELAY e SOL_AWC. Observa-se, também, que apenas nesse método a condutividade hidráulica do solo, que é uma medida da facilidade de movimento da água no solo, não mostrou sensibilidade relevante, sendo que nos demais métodos esse parâmetro foi classificado em 6º lugar em termos de significância da sensibilidade. No método PSO, o parâmetro mais sensível, GW_DELAY, também está interligado a água subterrânea e representa o intervalo de tempo para a recarga do aquífero. Ainda nesse método pode-se observar que o parâmetro SHALLST, que é a profundidade inicial do aquífero raso, foi um parâmetro sensível diferente dos demais métodos. Essa insignificância nos demais métodos pode ser explicada em função de o modelo ter sido submetido a um período de aquecimento e com isso as condições iniciais terem sido estabelecidas.

Calibração

O terceiro critério comparativo foi a análise dos resultados obtidos na minimização ou maximização das funções objetivo, apresentados na Figura 4 e na Tabela 2.

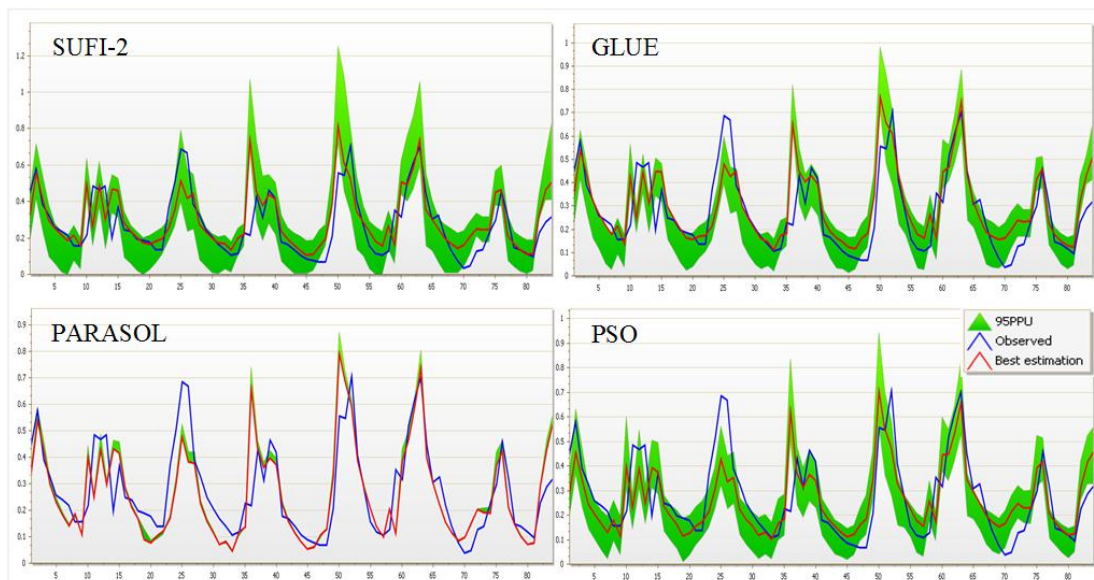


Figura 4. Hidrograma representando as vazões mensais simuladas e observadas e o intervalo da análise de incerteza resultante da aplicação dos métodos.

O intervalo de incerteza (95PPU) também pode ser observado na Figura 4 e a confiabilidade do ajuste e do grau de eficiência do modelo calibrado para as incertezas são avaliados pelo fator-p e fator-r são apresentados na Tabela . Teoricamente, o valor para o fator-p varia entre 0 e 100%, enquanto que o fator-r varia entre 0 e infinito. A condição com fator-p igual a 1 e o fator-r igual a 0 representaria uma simulação perfeita, correspondendo exatamente aos dados medidos. O grau em que os valores obtidos se distanciam desses números pode ser utilizado para avaliar a eficácia da calibração.

Em relação aos resultados obtidos dos valores do fator-p e do fator-r, observa-se que o método SUFI-2 apresentou o maior percentual do fator-p, enquanto o pior percentual encontrado para a variável de análise foi no método PARASOL. Analisando o fator-r pode-se observar que o método PARASOL apresentou o menor valor do fator-r, 0,06, porém nota-se que não há um equilíbrio entre ambos os fatores, o que não quer dizer que houve um grau de eficiência e confiabilidade aceitável do método. Essa diferença dos resultados obtidos pelo método PARASOL comparativamente aos demais métodos, possivelmente, está relacionada ao fato de que o método avalia a incerteza apenas pelas incertezas dos parâmetros de entrada, diferentemente das incertezas analisadas pelo SUFI-2, que incluem todas as fontes de incertezas do modelo.

Abbaspour et al. (2007) consideraram o algoritmo SUFI2 vantajoso por se tratar de um método similar ao Bayesiano inverso, na qual combina a otimização da função objetivo usada na calibração e na análise de incerteza.

Tabela 2. Resultado do fator-p e do fator-r para os diferentes métodos.

Função Objetivo	SUFI-2	GLUE	ParaSol	PSO
Fator-p	0.760	0.580	0.060	0.650
Fator-r	1.470	1.000	0.100	1.050
R ²	0.570	0.630	0.630	0.540
NS	0.500	0.590	0.570	0.530
br ²	0.402	0.461	0.519	0.320
MSE	0.014	0.012	0.012	0.013
SSQR	0.001	-	-	0.002

Atualmente, a função objetivo mais utilizada para o ajuste do modelo SWAT é o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NS), nesse caso, podemos observar uma superioridade do método GLUE frente aos demais métodos, apresentando diferenças significativas.

Em relação ao R², ao br² e ao MSE, os métodos GLUE e PARASOL apresentaram melhores resultados de otimização. O método PSO apenas se mostrou melhor ao método SUFI-2 no índice de eficiência de NS.

De forma similar a este estudo, Setegn et al. (2008) calibraram e validaram o modelo SWAT usando os algoritmos SUFI-2, GLUE e PARASOL. Concluindo que o SUFI-2 é um método eficaz, mas requer iterações adicionais, bem como a necessidade de adequação dos intervalos de parâmetros. Já o PARASOL não considera todas as fontes de incerteza, resultando assim em menores valores para os Fatores P e R. O método GLUE apresentou bons resultados, mas expõe a desvantagem de necessitar de uma capacidade computacional excessiva, devido à sua estratégia de amostragem aleatória.

Yang et al. (2008) implementaram cinco técnicas multicritério e multiobjetivo de análise de incerteza para o SWAT aplicado na Bacia Chaohe (China), GLUE, PARASOL, SUFI-2, MCMC (*Markov Chain e Monte Carlo*) e IS (quadro Bayesiano implementado usando técnicas de importância de amostragem). E ao compararem os resultados das performances de suas melhores estimativas, da incerteza de previsão, das bases conceituais, eficiência computacional, e da dificuldade de implementação, se computacionalmente viáveis, as abordagens Bayesianas são as mais recomendáveis pelos autores, principalmente, por causa da base conceitual sólida.

Sendo assim, pode-se observar ao final desta comparação preliminar entre os métodos que esses apresentam algumas diferenças nos resultados e, de modo simplificado e levando em consideração principalmente os resultados encontrados na calibração, o método GLUE pode ser considerado uma boa alternativa para se alcançar resultados satisfatórios e eficientes para as simulações com o modelo SWAT na região da bacia hidrográfica em estudo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de quatro diferentes métodos de análise multiobjetivo e multicritério durante as análises de sensibilidade e de incerteza e ao longo da calibração do modelo SWAT, com base na aplicação da ferramenta SWAT-CUP, evidenciou as diferenças nos resultados de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e também nos resultados do processo de calibração.

O método GLUE apresentou uma pequena superioridade em relação aos demais métodos na calibração do modelo. Essa diferença poderá ser melhor investigada aplicando-se a análise realizada

no presente trabalho, com base em dados de simulação mensal, para dados de simulação diária, e com maior gama de parâmetros que poderão influenciar no escoamento superficial, sedimentos ou nutrientes, e maiores ou menores intervalos dos parâmetros.

Observa-se, a partir das informações geradas, a necessidade de estudos específicos para cada bacia hidrográfica simulada com base no modelo SWAT, com a realização de testes com os diferentes métodos de análise multiobjetivo e multicritério disponibilizados pela ferramenta SWAT-CUP. A aplicação de determinado método de análise poderá ser mais ou menos eficiente nos diferentes ambientes. Os testes, para cada objetivo de estudo ou análise que pretende se desenvolver, podem contribuir com o aprimoramento do processo de simulação e com a melhoria das respostas das funções objetivo utilizadas na calibração.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à CAESB pela disponibilização dos dados, ao MCTI, FINEP, FAP-DF e CNPq pelo financiamento do projeto e pela bolsa de mestrado e a Capes pela bolsa PNPd.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K.C. (2011) SWAT-CUP2009: *SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual*. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 95 p.
- ABBASPOUR, K.C.; YANG, J.; MXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. (2007) Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, v. 333, p. 413–430
- BEVEN, K.; BINLEY, A. (1992) The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes* v. 6, pp. 279-298.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V.K. (1994) Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, v. 158, p. 265-284
- GARBOSSA, L.H.P.; VASCONCELOS, L.R.C.; LAPA, K.R.; BLAINSKI, E.; PINHEIRO, A. (2011) The use and results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: A review from 1999 until 2010. *2011 International SWAT Conference & Workshops*, Toledo – Espanha. 27 p.
- KENNEDY, J. E EBERHART, R.C. (1995). Swarm Intelligence. In. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, pp. 1942-1948.
- NASCIMENTO, L. S. V.; REIS JR. D. S. MARTINS, E. S. P. R. (2009) Avaliação do Algoritmo Evolutivo Mopso na Calibração Multiobjetivo do Modelo SMAP no Estado do Ceará. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* v. 14, n.1, pp. 85-97
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. (2005) *Soil and water assessment tool - Theoretical documentation version 2005*. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 541 p.
- SETEGN, S. G.; SRINIVASAN, R.; DARGAHI. (2008) Hydrological Modelling in the Lake Tana Basin, Ethiopia Using SWAT Model. *The Open Hydrology Journal* v. 49, pp. 49-62
- VAN GRIENSVEN. A. MEIXNER. T.. GRUNWALD. S.. BISHOP. T.. DILUZIO. M.. SRINIVASAN. R. (2006) A global Sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology* v. 324, pp. 10–23
- YANG, J.; REICHERT, P.; ABBASPOUR, K.C.; XIA, J.; YANG, H. (2008) Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology*, v. 358, pp. 1–23.