Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Análise de sensibilidade de parâmetros do modelo SWAT em uma sub-bacia da Região Nordeste, Brasil

Carolynne Wanessa Lins de Andrade¹, Suzana Maria Gico Lima Montenegro², José Romualdo de Sousa Lima³, Abelardo Antônio de Assunção Montenegro⁴, Raghavan Srinivasan⁵

¹ Professora da Unidade Acadêmica de Serra Talhada e doutoranda em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife-PE. carolynelins200@gmail.com (autor correspondente). ² Professora do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). suzanam@ufpe.br. ³ Professor da Unidade Acadêmica de Garanhuns da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). romualdo.lima@ufrpe.br. ⁴ Professor do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). abelardo.montenegro@yahoo.com.br. ⁵ Professor do Departamento de Ciências Espaciais da Universidade Texas A&M (EUA). r-srinivasan@tamu.edu.

Artigo recebido em 22/11/2016 e aceito em 02/04/2017

RESUMO

O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) tem sido amplamente utilizado como ferramenta de simulação hidrometeorológica e de qualidade da água, sendo que o mesmo é extremamente sensível a diversos parâmetros. Assim, é importante definir os mais influentes e mais relevantes sobre o modelo, para reduzir as incertezas e melhorar os resultados gerados. O objetivo deste trabalho consiste em avaliar os parâmetros do modelo SWAT aplicado a uma sub-bacia do Rio Mundaú. Foram selecionados 19 parâmetros relacionados aos processos de escoamento, solo, cultura, evapotranspiração e percolação e realizadas análises de sensibilidade global e local. De acordo com a análise global, os quatro parâmetros mais sensíveis do SWAT foram: a curva-número (CN) - CN2.mgt, o coeficiente de percolação - RCHRG_DP.gw, a profundidade do solo SOL_Z.sol e o coeficiente de Manning - OV_N.hru, com valores de t-stat de 4,28; 3,38; 2,44; 2,35; e p-value de 0,0004; 0,003; 0,02; 0,03, respectivamente. A partir da análise local, pode-se identificar os parâmetros mais sensíveis como sendo o CN2.mgt, o tempo para a recarga do aquífero - GW_DELAY.gw, o coeficiente de Manning - CH_N2.rte e o fator de compensação do consumo de água pelas plantas - EPCO.hru. Os parâmetros mais sensíveis para a sub-bacia do rio Mundaú foram aqueles relacionados com o escoamento superficial, fluxos subterrâneos, parâmetros do solo e culturas. A partir da análise de sensibilidade, estudos futuros podem ser realizados com o objetivo de calibrar e validar o modelo SWAT para a sub-bacia estudada e então proceder a simulação de cenários diversos.

Palavras-chave: modelagem hidrológica, recursos hídricos, SWATCUP.

Sensitivity analysis of SWAT model parameters applied in a sub-basin of Northeast Region, Brazil

ABSTRACT

The *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) model has been widely used as hydrometeorological and water quality simulation tool, and it is extremely sensitive to the various parameters. Thus, it is important to define the most influential and most relevant on the model, to reduce uncertainties and improve the generated results. The aim of this study is to evaluate the parameters of the SWAT model applied to a sub-basin of the Mundaú River. Nineteen parameters were selected related to flow processes, soil, culture, evapotranspiration and percolation and performed global and local sensitivity analyzes. According to the global analysis, the four most sensitive parameters of SWAT were: the curve-number (CN) - CN2.mgt, the percolation coefficient - RCHRG_DP.gw, the soil depth - SOL_Z.sol and Manning coefficient - OV_N.hru, with t-stat values of 4.28; 3.38; 2.44; 2.35 and p-value of 0.0004; 0.003; 0.02; 0.03, respectively. From the local analysis, the most sensitive parameters were identified as the CN2.mgt, the time for aquifer recharging - GW_DELAY.gw, Manning coefficient - CH_N2.rte and compensation factor and water consumption by plants - EPCO.hru. The most sensitive parameters of the SWAT model for the sub-basin of the Mundaú river were those related to surface runoff, groundwater flow, soil parameters and cultures. From the sensitivity analysis, future studies can be performed in order to calibrate and validate the SWAT model for the studied sub-basin and then proceed to simulate various scenarios.

Keywords: hydrologic modeling, water resources, SWATCUP.

Introdução

O aumento da utilização dos recursos naturais pelo homem, o crescimento populacional e o manejo inadequado do solo e da água, entre outros fatores, estão agravando os problemas relacionados ao abastecimento local, regional e nacional de água (Abbaspour et al., 2015). Em regiões com variações interanuais de precipitações marcantes e altas taxas evaporativas, como algumas do Nordeste brasileiro, os problemas de abastecimento hídrico são ainda maiores.

Dentro deste contexto, a utilização de modelos hidrológicos vem crescendo cada vez mais, constituindo uma ferramenta de apoio ao planejamento e à tomada de decisão sobre os usos múltiplos dos recursos hídricos. Além disso, segundo Lelis et al. (2012), a análise dos processos entre as variáveis hidrológicas dificilmente pode ser feita experimentalmente; e por isso, a modelagem pode auxiliar na investigação dos impactos provenientes da adoção de diferentes práticas agrícolas.

Dentre os diversos modelos hidrológicos, tem-se o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). No Brasil e no mundo, o SWAT vem ganhando força com aplicações diversas (Strauch et al., 2012; Castro, 2013; Silva, 2014; Bressiani et al., 2015 e Bressiani, 2016), por se tratar de um modelo de grande complexidade e por abranger diversos componentes hidrossedimentológicos, constituindo uma ferramenta poderosa no auxílio à tomada de decisão em estudos de planejamento ambiental.

O SWAT é um modelo versátil, que considera diferentes componentes hidrológicos e agrônômicos e tem sido aplicado por muitas instituições governamentais e privadas, assim como universidades e outras instituições interessadas no suporte à tomada de decisões na gestão dos recursos hídricos (Bressiani et al., 2015). Um extenso número de análises já foi realizado com o SWAT em todo o mundo, incluindo estudos sobre diferentes cenários de mudanças climáticas, cenários de mudança no uso e ocupação do solo, melhores estratégias de irrigação, aplicação de boas práticas de manejo (BMP's), adoção de culturas bioenergéticas, transporte de nutrientes, como fósforo e hidrogênio, poluição por pesticidas e transporte de sedimentos (Gassman et al., 2014).

O SWAT é extremamente sensível à qualidade dos dados utilizados na modelagem hidrossedimentológica, como os dados referentes ao uso e ocupação do solo, tipos de solo, topografia e dados climáticos. Em relação aos parâmetros de entrada, não é possível estudar a incerteza de todos

eles. Desta forma, é importante definir os parâmetros mais influentes e mais relevantes sobre o modelo, de forma que se possa dar um destaque maior à aquisição e ao refinamento desses parâmetros e, assim, reduzir as incertezas e melhorar os resultados gerados (Jha, 2009).

Diversos autores vêm realizando estudos nesse sentido, e em grande parte dos trabalhos, os parâmetros apontados como os mais sensíveis estão relacionados com as propriedades físicas do solo, como densidade, condutividade hidráulica e, particularmente, capacidade de água disponível, além da curva-número (CN), que é um parâmetro utilizado para obter previsões do escoamento superficial ou de infiltração da água no solo (Jha, 2009; Cibir et al., 2010). Ao fim da análise de sensibilidade, os parâmetros identificados como os mais sensíveis são geralmente utilizados para a calibração do modelo (Cibir et al., 2010; Baltokoski et al., 2010).

O SWAT-CUP (Abbaspour et al., 2007) é um programa independente que foi desenvolvido para análises de incertezas e sensibilidade, processos de calibração e validação, a partir de simulações com o SWAT. O programa contém cinco procedimentos de calibração, onze funções objetivas e inclui aplicações como a visualização da área de estudo usando o Bing Map.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho consiste em avaliar os parâmetros do modelo SWAT aplicado a uma sub-bacia do Rio Mundaú, Nordeste do Brasil, a fim de definir os mais sensíveis, levando-se em consideração a influência do uso e ocupação do solo, topografia e outros fatores físicos e climáticos, e, com isso, permitir a seleção dos parâmetros considerados como os mais sensíveis para futuros procedimentos de calibração e validação do modelo para a bacia hidrográfica em estudo e simulação de cenários diversos.

Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Mundaú, que está localizada entre as coordenadas 08° 51' 34" e 09° 14' 9" de latitude sul, e 36° 35' 11" e 36° 10' 42" de longitude oeste. A sub-bacia utilizada no estudo (749,8 km²) está localizada na porção do Alto Mundaú, onde estão inseridos os municípios Garanhuns, Brejão, Lagoa do Ouro e Correntes, no estado de Pernambuco; e Quebrangulo, Chã Preta e Santana do Mundaú na porção alagoana (Figura 1).

A região apresenta clima, segundo a classificação de Köppen, Aw (Tropical, com estação seca no inverno), sendo uma pequena

porção a noroeste da bacia composta pelo clima BSh (clima das estepes quentes com baixas latitudes e altitudes) (Pauwels, 2002).

Os solos existentes na bacia do Rio Mundaú são, em maioria, Argissolos amarelos e Argissolos vermelho-amarelo; existem ainda Neossolos, Latossolos, Planossolos, Solos litólicos e Solos de mangue.

A bacia do Rio Mundaú possui grande relevância para a atividade agropecuária, onde é considerada, na porção pernambucana, como uma bacia leiteira, devido às grandes produções de laticínios advindas da criação de bovinos, além da

criação de frangos de corte; também possui grande importância para o cultivo da cana-de-açúcar na porção alagoana, uma vez que nessas áreas estão concentradas grandes usinas de produção. A bacia é predominantemente rural e coberta principalmente por pastagem e cana-de-açúcar, mas ainda possui áreas com cobertura florestal e áreas urbanas.

As condições topográficas da sub-bacia são de elevações mínimas de 13 m e máximas de 63 m, com uma altitude média de aproximadamente 38 m (Figura 2).

Figura 1. Localização da área de estudo.

Modelo SWAT

O SWAT (*Soil Water Assessment Tool*) é um modelo hidrossedimentológico que foi desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold e sua equipe no *Agricultural Research Service of the United States Department of Agricultural* (ARS – USDA) para analisar os impactos das alterações do uso do solo sobre o escoamento da água, produção de sedimentos e qualidade da água em grandes bacias hidrográficas não instrumentadas (Arnold et al., 1998).

A classificação do SWAT é do tipo semiconceitual, semidistribuído, de base física e contínuo no tempo, o que permite que diferentes

processos físicos sejam simulados na área de estudo. Os principais componentes do modelo são: clima, hidrologia (escoamento superficial, percolação, interceptação, infiltração, escoamento subsuperficial, escoamento de base e evapotranspiração), temperatura do solo, crescimento de plantas, nutrientes, pesticidas, bactérias e patógenos, e manejo do solo. O modelo hidrológico é baseado na equação do balanço hídrico (Arnold et al., 1998):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R - Q - ET - P - QR) \quad (1)$$

Em que: SW_t é o conteúdo de água no tempo t , SW_0 conteúdo de água inicial no solo, e R , Q , ET , P e QR são precipitação, escoamento, evapotranspiração, percolação e fluxo de retorno, respectivamente. Todas as unidades são em mm.

No início da modelagem hidrológica com o SWAT, a bacia hidrográfica é dividida em várias microbacias e a quantidade destas depende da área mínima de drenagem. Com a delimitação finalizada, o modelo faz combinações entre o uso e ocupação do solo, tipos de solos e declividade, dando origem às Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's). A estimativa da evapotranspiração, assim como o escoamento superficial é procedida separadamente para cada HRU, para possibilitar uma melhor representação física dos processos hidrológicos (Strauch et al., 2012).

Dados de entrada

O SWAT requer quatro tipos principais de dados de entrada, três tipos são considerados dados espaciais e um tipo representa os dados tabulares. O primeiro dado espacial é o mapa de uso e ocupação do solo, que pode ser confeccionado a partir de ferramentas de processamento digital de imagens a partir de imagens de satélites; o segundo

dado é o mapa de tipos de solo da área de estudo, que pode ser obtido junto aos órgãos públicos, como por exemplo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA); o terceiro e último tipo de dado espacial é o mapa digital de elevação (MDE), que também pode ser obtido junto a diversas instituições públicas ou privadas, como a EMBRAPA Monitoramento por Satélite. Os dados tabulares utilizados pelo modelo SWAT para a modelagem hidrológica devem ser diários e de variáveis hidrometeorológicas como: precipitação (mm) (variável que mais influencia a modelagem com o SWAT), temperaturas máximas e mínimas do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m s^{-1}) e radiação solar (MJ m^{-2}). Mais informações sobre as fontes de obtenção da base de dados para a aplicação do modelo SWAT no Brasil podem ser obtidas em Bressiani et al. (2015).

O mapa digital de elevação (MDE) foi obtido pela EMBRAPA Monitoramento por Satélite, onde são disponibilizados arquivos sobre a altimetria do Brasil. As imagens SRTM possuem formato Geotiff (16 bits), com resolução espacial de 90 m e Sistema de Coordenadas Geográficas WGS-84 (Figura 2).

Figura 2. Mapa digital de elevação da sub-bacia do Rio Mundaú.

O mapa de uso e ocupação (Figura 3) foi construído a partir de informações obtidas pelo

Ministério do Meio Ambiente (MMA) e pela Companhia Nacional de Abastecimento

(CONAB). O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado a partir de imagens (três cenas) do satélite LANDSAT 5, com instrumento TM e Órbitas/Ponto 214/66, 214/67 e 215/66, para os anos de 2010 e 2011, obtidos junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O

mapeamento foi realizado empregando-se o método de classificação supervisionada, adotando-se o classificador de máxima verossimilhança. O uso do solo foi dividido em cinco classes: Caatinga, Pastagem, Agricultura, Área urbana e Água.

Figura 3. Mapa de tipos de solos da sub-bacia do Rio Mundaú.

O mapa de tipos de solos (Figura 4) foi obtido a partir de dados fornecidos pela EMBRAPA Solos, com base nas informações fornecidas pelos Zoneamentos Agroecológicos de

Pernambuco (ZAPE) e de Alagoas (ZAAL), que possuem mapas de solos nesses estados na escala de 1:100000.

Figura 4. Mapa de tipos de solos da sub-bacia do Rio Mundaú.

Os parâmetros físicos do solo requeridos pelo modelo SWAT foram calculados a partir de funções de pedotransferência desenvolvidas por Saxton e Rawls (2006). As informações

granulométricas e de matéria orgânica necessárias para a utilização dessas funções, foram obtidas pela literatura, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Referências utilizadas para coleta de parâmetros físicos dos solos

Número	Tipo de solo	Estado	Referência consultada
1	Argissolo Amarelo	AL	Silva et al. (2012)
2	Argissolo Amarelo	PE	Oliveira & Nascimento (2006)
3	Argissolo Vermelho-Amarelo	PE	Oliveira & Nascimento (2006)
4	Argissolo Vermelho-Amarelo	AL	Jacomine et al. (1975)
5	Gleissolo	AL	Silva et al. (2012)
6	Latossolo Amarelo	PE	Araújo et al. (2015)
7	Latossolo Amarelo	AL	Silva et al. (2012)
8	Latossolo Vermelho-Amarelo	AL	Jacomine et al. (1975)
9	Neossolo Flúvico	AL	Jacomine et al. (1975)
10	Neossolo Litólico	AL	Jacomine et al. (1975)
11	Neossolo	PE	Oliveira & Nascimento (2006)
12	Neossolo Quartzarênico	AL	Silva et al. (2012)
13	Planossolo Háplico	AL	Jacomine et al. (1975)
14	Planossolo	PE	Parahyba et al. (2010)
15	Solo Litólico	PE	Oliveira & Nascimento (2006)
16	Solos de Mangue	AL	Jacomine et al. (1975)

O levantamento dos dados pluviométricos foi realizado a partir da coleta de informações da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), uma vez que foram utilizadas para essa sub-bacia apenas estações pluviométricas inseridas no estado de PE. Para os dados fluviométricos,

foram obtidas informações junto à Agência Nacional de Águas, através do seu Sistema de Informações Hidrológicas, Hidroweb. A Tabela 2 e a Figura 5 apresentam as estações pluviométricas e fluviométricas presentes na sub bacia do Rio Mundaú que foram selecionadas para o estudo.

Figura 5. Mapa da localização das estações de monitoramento na bacia hidrográfica do Rio Mundaú com destaque para a sub-bacia em estudo.

Tabela 2. Estações pluviométricas e fluviométricas selecionadas para a simulação

Código	Município/UF	Instituição	Latitude	Longitude
Sub bacia 1				
19	Garanhuns/PE	APAC	-8.8833	-36.4878
443	Brejão/PE	APAC	-9.0261	-36.5661
936114*	Santana do Mundaú/AL	ANA	-9.1689	-36.2197

* Estação fluviométrica

As informações meteorológicas como temperatura máxima e mínima ($^{\circ}\text{C}$), radiação solar (MJ m^{-2}), umidade relativa (%) e velocidade do vento (m s^{-1}) foram adquiridas da estação

climatológica Garanhuns-PE (Tabela 3 e Figura 5), junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Tabela 3. Estação climatológica selecionada para o estudo

Estação	Código	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Garanhuns – PE	82893	-8,88°	-36,51°	822,76

O período definido para o estudo do comportamento hidrológico da sub bacia compreendeu os anos de 2000 a 2014, totalizando 15 anos de dados. Os três primeiros anos foram destinados ao período de aquecimento do modelo, não sendo considerados para a simulação hidrológica.

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade dos parâmetros da sub-bacia do rio Mundaú foi realizada a partir do programa SWATCUP, um *software* independente, desenvolvido para análises de incertezas e sensibilidade, processos de calibração e validação, a partir de simulações com o SWAT (Abbaspour et al., 2007). O método utilizado no

SWATCUP foi o SUFI-2. O estudo de sensibilidade foi fundamentado na análise dos parâmetros e variáveis de entrada do modelo, para observar aqueles que, quando alterados, exercem influência significativa nos resultados. Foram selecionados 19 parâmetros relacionados aos processos de escoamento, evapotranspiração, percolação, recarga, infiltração, etc. para uma primeira análise. Cada parâmetro possui valores padrão mínimos e máximos, e tais valores podem ser encontrados no manual do SWAT bem como na literatura, além dos valores de conhecimento do modelador.

A análise de sensibilidade foi inicialmente realizada, de forma automática, por meio da ferramenta *Sensitivity Analysis* do SWATCUP (SUFI-2) na BHRM, considerando uma análise de sensibilidade global com tais parâmetros, a fim de verificar os que possuem maior influência e os mais sensíveis.

A sensibilidade dos parâmetros é determinada por meio da aplicação de um sistema de regressão múltipla, em que os parâmetros gerados pela Amostragem Hipercúbica Latina são relacionados com os valores das funções objetivas. O *t-test* é utilizado para identificar a significância relativa de cada parâmetro, e quanto maior valor (em termos absolutos) o parâmetro possuir, mais sensível ele será. O *p-value* determina a significância da sensibilidade e valores próximos de zero indicam os parâmetros mais significantes (Abbaspour, 2015).

O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), escolhido como função objetiva, pode ser calculado através da equação seguinte (Eq. 2):

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_{obs} - Q_{sim})_i^2}{\sum_i (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2)$$

Em que: Q_{obs} é a vazão observada, Q_{sim} é a vazão simulada, e $\bar{Q}_{obs}$ é a média das vazões observadas.

O NSE varia entre menos infinito e 1 (valor ótimo). Valores entre 0 e 1 geralmente são vistos como níveis de desempenho aceitáveis e valores ≤ 0.0 , indicam que é melhor utilizar a média dos dados observados que o valor predito pelo modelo (Nash e Sutcliffe, 1970).

A significância relativa dos parâmetros indicada pelo *t-test* é subjetiva aos alcances dos parâmetros. Desta forma, os resultados da análise de sensibilidade podem mudar entre as diferentes iterações no processo de parametrização, uma vez que a cada iteração os intervalos dos parâmetros são modificados (Bressiani, 2016). Assim, foi realizada uma análise de sensibilidade local, a partir de algumas simulações com o SWATCUP,

considerando cada parâmetro separadamente, com o objetivo de verificar como as mudanças do parâmetro estudado afetam a performance do modelo. Essa análise de sensibilidade local também foi realizada para identificar uma possível relação do parâmetro com a função objetiva (linear, polinomial, logarítmica, etc.), a partir da observação dos *Dotty Plots* gerados pelo SWATCUP.

Resultados e discussão

Os resultados da análise de sensibilidade automática para a variável vazão, realizada pela ferramenta *Sensitivity Analysis* do SWATCUP são apresentados na Tabela 4. Nela registram-se o nome do parâmetro no SWAT, sua descrição, e o *ranking* do nível de sensibilidade, que variou entre 1 e 19 para a área de estudo nas condições da simulação da sub-bacia do rio Mundaú.

Os resultados apresentados evidenciam que a sensibilidade dos parâmetros é influenciada, especialmente, por variáveis relacionadas com o escoamento superficial, como a curva-número (CN) para a condição de umidade AMCII - CN2.mgt e o coeficiente de Manning para fluxo terrestre - OV_N.hru, com o fluxo de água subterrânea e lateral, como o coeficiente de percolação da água para o aquífero profundo - RCHRG_DP.gw e o tempo do fluxo lateral - LAT_TTIME.hru, com parâmetros físicos do solo, como a profundidade do solo - SOL_Z.sol, e com parâmetros de vegetação, como a quantidade máxima de água interceptada pela vegetação - CANMX.hru, conforme o peso de cada um dos fatores. De acordo com Schmalz e Fohrer (2009), a sensibilidade dos parâmetros é influenciada, principalmente, pelo uso e ocupação do solo, pelo relevo e por outros parâmetros físicos e climáticos.

De modo geral, dentre os parâmetros analisados, 12 mostraram alguma sensibilidade, ou seja, têm influência sobre o escoamento nas condições estudadas, ressaltando-se que o valor 19 para a sensibilidade significa que o parâmetro não exerceu nenhuma influência para a variável analisada. A Figura 6 apresenta a relação entre os parâmetros com o *t-Stat* (absoluto), indicando o parâmetro mais sensível (com maior valor de *t-Stat*) até o parâmetro que não apresentou sensibilidade para as condições estudadas. De acordo com os resultados, o parâmetro mais sensível para a sub-bacia do rio Mundaú foi o CN2.mgt, seguido por RCHRG_DP.gw, SOL_Z.sol, OV_N.hru, CANMX.hru e LAT_TTIME.hru, respectivamente. O parâmetro que não apresentou sensibilidade para o escoamento na sub-bacia estudada foi o

SOL_AWC.sol, e outros parâmetros como por exemplo, o CH_K2.rte, SOL_K.sol, ESCO.bsn e GW_REVAP.gw, apresentaram baixa sensibilidade, ficando entre os últimos lugares do *ranking* apresentado na Tabela 4. Lelis et al. (2012), também observaram que o parâmetro curva-número (CN) para a condição de umidade AMCII – CN2.mgt foi o mais sensível para duas sub-bacias da bacia hidrográfica do ribeirão São

Bartolomeu, região Sudeste do Brasil. Entretanto, outro parâmetro classificado como muito sensível por esses autores, o SOL_AWC.sol, no presente estudo, não foi considerado como um parâmetro de alta sensibilidade. Os parâmetros SOL_Z.sol e CANMX.hru também apresentaram sensibilidade por esses autores, concordando com os resultados do presente trabalho

Tabela 4. Análise de sensibilidade automática para a variável vazão

Nome	Descrição	Ranking
ALPHA_BF.gw	Constante de recessão do escoamento de base (dias)	9
CANMX.hru	Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação (mm)	5
CH_K2.rte	Condutividade hidráulica efetiva do canal principal (mm h^{-1})	15
CH_N2.rte	Coefficiente de Manning para o canal principal ($\text{s m}^{-1/3}$)	13
CN2.mgt	Curva-número (CN) para a condição de umidade AMCII (adimensional)	1
CNCOEF.bsn	Coefficiente úmero da curva de evapotranspiração da planta	8
ESCO.hru	Fator de compensação de evaporação da água no solo (adimensional)	17
GW_DELAY.gw	Intervalo de tempo para a recarga do aquífero (dias)	10
GW_REVAP.gw	Coefficiente de ascensão da água à zona de saturação (adimensional)	18
GWQMN.gw	Nível limite de água no aquífero raso para ocorrência do fluxo de base (mm)	12
LAT_TTIME.hru	Tempo do fluxo lateral (dias)	6
OV_N.hru	Coefficiente de Manning para fluxo terrestre	4
RCHRG_DP.gw	Coefficiente de percolação da água para o aquífero profundo (mm)	2
REVAPMN.gw	Profundidade limite da água no aquífero para ocorrência da ascensão da água à zona não saturada (mm)	7
SOL_AWC.sol	Capacidade de água disponível (mm mm^{-1})	19
SOL_K.sol	Condutividade hidráulica saturada (mm h^{-1})	16
SURLAG.bsn	Tempo de retardamento do escoamento superficial direto (dias)	11
EPCO.hru	Fator de compensação do consumo de água pelas plantas (adimensional)	14
SOL_Z.sol	Profundidade do solo (mm)	3

Figura 6. Análise de sensibilidade global com passo de tempo mensal.

A Tabela 5 apresenta os parâmetros e os seus respectivos valores de *t-Stat* (absoluto) e *P-Value*, obtidos junto a calibração automática com o SWATCUP (SUFI-2).

De acordo com os resultados da Tabela 5, o CN2.mgt foi considerado como o mais sensível para o escoamento na sub-bacia do rio Mundaú, uma vez que apresentou o maior valor de *t-Stat*, em termos absolutos, com 4,28 e menor valor de *P-Value*, com valor de 0,0004. O segundo parâmetro mais sensível considerado pela calibração automática foi o RCHRG_DP.gw, com *t-Stat*, em termos absolutos, de 3,38 e de *P-Value* de 0,003. O terceiro, quarto e quinto parâmetros mais sensíveis

foram o SOL_Z.sol, OV_N.hru e CANMX.hru, com valores de *t-Stat* de 2,44; 2,35 e 1,92; e valores de *P-Value* de 0,0241; 0,029 e 0,0695, respectivamente.

Dentre os parâmetros de maior sensibilidade no SWAT, de acordo com diversos autores, pode-se citar o CN2.mgt (Jha (2009); Cibin et al., (2010); Santosh et al., (2010), Lelis et al., (2012) e Bressiani (2016)); RCHRG_DP.gw (Jha, (2009), Schmalz e Fohrer (2009) e Bressiani (2016)); e o SOL_Z.sol (Schmalz e Fohrer, 2009).

Os resultados da análise de sensibilidade local, realizada considerando cada parâmetro separadamente, são apresentados na Figura 7.

Tabela 5. Valores de *t-Stat* (absoluto) e *P-Value* para os parâmetros analisados

<i>Ranking</i>	Parâmetro	<i>t-Stat</i> (absoluto)	<i>P-Value</i>
1	CN2.mgt	4,28	0,0004
2	RCHRG_DP.gw	3,38	0,0030
3	SOL_Z.sol	2,44	0,0241
4	OV_N.hru	2,35	0,0290
5	CANMX.hru	1,92	0,0695
6	LAT_TTIME.hru	1,86	0,0773
7	REVAPMN.gw	1,58	0,1291
8	CNCOEF.bsn	1,45	0,1623
9	ALPHA_BF.gw	1,26	0,2209
10	GW_DELAY.gw	1,21	0,2418
11	SURLAG.bsn	0,89	0,3844
12	GWQMN.gw	0,65	0,5260
13	CH_N2.rte	0,49	0,6282
14	EPCO.bsn	0,45	0,6592
15	CH_K2.rte	0,31	0,7596
16	SOL_K.sol	0,25	0,8059
17	ESCO.bsn	0,19	0,8491
18	GW_REVAP.gw	0,06	0,9543
19	SOL_AWC.sol	0,02	0,9849

Figura 7. Variações do coeficiente de Nash- Sutcliffe (NS) baseado nas mudanças dos parâmetros do modelo SWAT.

Os gráficos apresentados na Figura 7 mostram as relações entre o parâmetro estudado com a função objetiva, o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS). O principal objetivo destes gráficos é mostrar a distribuição dos pontos de amostragem, bem como dar uma ideia da sensibilidade do parâmetro. Os gráficos também apresentam se a função objetiva é ou não sensível ao parâmetro. Se os pontos estão espalhados e ao acaso, a sensibilidade é considerada baixa. Se houver uma tendência (linear, logarítmica, polinomial, etc.), a sensibilidade é alta (Abbaspour, 2015).

Pode-se identificar claros padrões de relações entre os parâmetros e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS). O parâmetro CN2.mgt tem um grande impacto na performance do NS, com uma relação de crescimento próxima da logarítmica, e observa-se que os melhores intervalos para esse parâmetro provavelmente devem ser acima de 0,05 (em mudança relativa, significa um aumento de no mínimo 5%). GW_DELAY.gw também apresentou o comportamento inverso do logarítmico, e o seu intervalo máximo provavelmente não deve estar acima de 30 (em termos absolutos). Os parâmetros

CH_N2.rte, e EPCO.hru também apresentaram comportamento semelhante a uma curva logarítmica de crescimento, e melhores valores para EPCO.hru não devem ser menores do que 0,6.

Os parâmetros que apresentaram relação próxima a linear foram RCHRG_DP.gw, CANMX.hru, SOL_Z.sol e CH_K2.rte. Os melhores valores da performance do modelo ocorreram quando RCHRG_DP.gw ficou próximo a 0,1; para CANMX.hru valores próximos a 20; para SOL_Z.sol valores em torno de 0,2 (variação mínima de 20%) e para CH_K2.rte valores próximos a 25. Bressiani (2016), estudando a bacia hidrográfica do Rio Piracicaba, Sudeste do Brasil, também verificou uma relação linear entre o parâmetro CANMX.hru e o coeficiente NS.

Os parâmetros que não tiveram impacto sobre a função objetiva, ou seja, os parâmetros que apresentaram baixa ou nenhuma sensibilidade, foram o LAT_TTIME.hru, o REVAPMN.gw, o SURLAG.bsn, o CNCOEF.bsn, o GW_REVAP.gw e o ESCO.hru, uma vez que nenhuma relação foi verificada. No entanto, Bressiani (2016) verificou relações logarítmicas de crescimento e de diminuição para o LAT_TTIME.hru e o SURLAG.bsn, respectivamente. Os demais parâmetros não apresentaram padrões que pudessem ser verificados claramente.

A partir da análise de sensibilidade local, pode-se identificar os parâmetros mais sensíveis como sendo o CN2.mgt, GW_DELAY.gw, CH_N2.rte, EPCO.hru RCHRG_DP.gw, CANMX.hru, SOL_Z.sol e CH_K2.rte. A maioria desses parâmetros também foram considerados como sensíveis pela análise de sensibilidade global, e o CN2.mgt, RCHRG_DP.gw, CANMX.hru e SOL_Z.sol estão entre os 5 mais sensíveis do ranking obtido pela análise global (Tabela 4).

Entretanto, houveram algumas divergências entre os resultados da análise de sensibilidade global e local, como a grande sensibilidade dos parâmetros LAT_TTIME.hru e REVAPMN.gw, parâmetros estes identificados como muito sensíveis na análise global, e com baixa ou nenhuma sensibilidade na análise local. A análise de sensibilidade global verifica as alterações médias na função objetiva de acordo com a mudança do parâmetro analisado, enquanto todos os outros parâmetros também estão sofrendo variações. Por isso, essa análise é relativa e fornece apenas informações parciais sobre a sensibilidade dos parâmetros (Abbaspour et al., 2007). A partir da análise local, verifica-se que os pontos de amostragem não apresentam nenhuma relação, ou seja, a função objetiva não sofre alterações com a

modificação do parâmetro dentro do intervalo estabelecido. Desta forma, tais variáveis não são consideradas sensíveis e podem ser retiradas do processo futuro de calibração.

Conclusões

1. Os parâmetros mais sensíveis do modelo SWAT para a sub-bacia do rio Mundaú foram aqueles relacionados com o escoamento superficial, fluxos subterrâneos, solos e culturas, como curva-número, percolação da água para o aquífero profundo, profundidade do solo e interceptação da água pela vegetação.
2. As análises de sensibilidade global e local concordaram sobre a sensibilidade de vários parâmetros, no entanto, alguns parâmetros considerados sensíveis na análise global não apresentaram sensibilidade na análise local.
3. A partir da análise de sensibilidade e verificação dos parâmetros mais sensíveis, estudos futuros podem ser realizados com o objetivo de calibrar e validar o modelo SWAT para a sub-bacia estudada e realizar simulações de cenários futuros.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FACEPE pela bolsa de doutorado do primeiro autor (IBPG-0231-5.03/14 e BCT-0176-5.03/14 - convênio APAC), ao CNPq pelas bolsas PQ do segundo, terceiro e quarto autores, à CAPES pelo projeto PVE – CAPES (PVE aupex 2792/2013 proc 23038007733/2013-76, ao CNPq (Processos N. 446254/2015-0; 307641/2013-9), ao Projeto SUPeR, nº 446254/2015-0 e ao FINEP (REHIDRO 1830).

Referências

- Abbaspour, K. C., 2015. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. Disponível: http://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf. Acesso: 10 out. 2016.
- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., Klove, B., 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology* 524, 733–752.
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, 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* 333,413-430.
- Araújo, J. K. S., Corrêa, M. M., Galindo, I. C. L., Souza-Júnior, V. S., 2015. Caracterização de Latossolos amarelos húmicos em um ambiente altimontano na região Agreste do Estado de Pernambuco, Brasil. *Bioscience Journal* 31, 146-160.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J. R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34, 73-89.
- Baltokoski, V., Tavares, M. H. F., Machado, R. E., Oliveira, M. P., 2010. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR). *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34, 253-261.
- Bressiani, D. A., 2016. Coping with hydrological risks through flooding risk index, complex watershed modeling, different calibration techniques, and ensemble streamflow forecasting. Tese (Doutorado). São Paulo, USP.
- Bressiani, D. A., Gassman, P. W., Fernandes, J. G., Garbossa, L. H. P., Srinivasan, R., Bonumá, N. B., Mendiondo, E. M., 2015. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 8, 9-35.
- Castro, K. B., 2013. Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada. Dissertação (Mestrado). Brasília, UnB.
- Cibin R., Sudheer, K. P., Chaubey, I., 2010. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. *Hydrological Processes* 24, 1133-1148.
- Gassman, P. W., Sadeghi, A. M., Srinivasan, R., 2014. Applications of the SWAT model special section: overview and insights. *Journal of Environmental Quality* 43, 1-8.
- Jacomine, P. K. T., Cavalcanti, A. C., Pessôa, S. C. P., Silveira, C. O., 1975. Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do estado de Alagoas. EMBRAPA/SUDENE, Recife.
- Jha, M., 2009. Hydrologic Simulations of the Maquoketa River Watershed Using SWAT. Disponível: http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/51123/2/09-WP_492.Jha.pdf. Acesso: 03 out. 2016.
- 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* 36, 623-634.
- Oliveira, A. B., Nascimento, C. W. A., 2006. Formas de manganês e ferro em solos de referência de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 30, 99-110.
- Parahyba, R. B. V., Santos, M. C., Rolim Neto, F. C., Jacomine, P. K. T., 2010. Pedogênese de Planossolos em topossequência do Agreste pernambucano. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34, 1991-2000.
- Pauwels, G. J., 2002. Atlas Geográfico Melhoramentos, 5ª Ed. Editora Melhoramentos, São Paulo.
- Santosh, T., Kolladi, R., Surya, T., 2010. Influence of scale on SWAT model calibration for streamflow in a river basin in the humid tropics. *Water Resources Management* 24, 4567-4578.
- Saxton K. E., Rawls W. J., 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of Agronomy Journal* 70, 1569-1578.
- Schmalz, B., Fohrer, N., 2009. Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT model. *Advances in Geosciences* 21, 91-98.
- Silva, A. B., Accioly, L. J. O., Gomes, E. C., Silveira, H. L. F., Barbosa, G. M. N., 2012. Identificação e caracterização dos principais solos do município de Coruripe, Alagoas. *Pesquisa Agropecuária Pernambucana* 17, 59-65.
- Silva, C. A. I., 2014. Análise de aplicabilidade da interface do modelo hidrológico SWAT-SIG no estudo da produção de sedimentos em uma bacia no Nordeste do Brasil. Dissertação (Mestrado). Maceió, UFAL.
- Silva, J. M. A., Pruski, F. F., Rodrigues, L. N., Cecilio, R. A., 2009. Modelo para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 4, 78- 84.
- Strauch, M., Bernhofer, C., Koide, S., Volk, M., Lorz, C., Makeschin, F., 2012. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 414–415, 413-424.