

## Simulação Hidrológica Escalar com o Modelo SWAT

José de Oliveira Melo Neto<sup>1</sup>, Antônio Marciano da Silva<sup>1</sup>, Carlos Rogério de Mello<sup>1</sup>,  
Arisvaldo Vieira Mello Júnior<sup>2</sup>

josenetoengr@posgrad.ufla.br; marciano@deg.ufla.br; crmello@deg.ufla.br; arisvaldo@usp.br

Recebido: 03/06/13 - revisado: 09/07/13 - aceito: 23/10/13

---

### RESUMO

A modelagem hidrológica é uma ferramenta útil para predição do comportamento dinâmico da água em uma bacia hidrográfica e, por conseguinte, a estimativa detalhada do balanço hídrico é uma informação de grande valia para a gestão dos recursos hídricos. Entretanto, os fenômenos que regem o ciclo hidrológico apresentam distribuição heterogênea tanto no espaço quanto no tempo, o que dificulta a sua estimativa. Dentro dessa perspectiva, o objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na estimativa do escoamento em duas bacias hidrográficas com escalas espaciais distintas. O modelo foi aplicado à bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguará (BHRJ – mesoescala) e na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela (BHRM – microescala), ambas com predomínio de Latossolos na região do Alto Rio Grande. Foram utilizados índices estatísticos para avaliar a precisão quali-quantitativa do modelo na simulação do escoamento. O SWAT simulou de modo satisfatório o escoamento para a BHRJ apresentando coeficiente de Nash-Sutcliffe entre 0,58 e 0,71 na fase de calibração e de 0,46 na fase de validação. Em contrapartida, na microescala o modelo obteve desempenho inadequado com valores dos índices estatísticos abaixo dos limites recomendados na literatura.

**Palavras-chave:** estimativa de escoamento, microescala, mesoescala, desempenho de modelo

---

### INTRODUÇÃO

O monitoramento de variáveis hidrológicas necessita de grandes investimentos a fim de implementar uma infraestrutura capaz de cobrir todas as regiões de interesse, fator este que justifica a escassez de dados observados em diversas áreas, especialmente em bacias de pequeno porte. Associado a isto, os dados observados estão restritos aos locais onde se encontram os postos de medição, produzindo assim lacunas espaços-temporais na disponibilidade de informações hidrológicas.

O emprego de modelos tem sido a alternativa mais explorada no intuito de preencher as lacunas acima citadas. Estas ferramentas têm por finalidade expressar o comportamento do objeto de estudo tomando por base a dinâmica dos processos hidrológicos no qual são fundamentados e de acordo com diferentes entradas (CIBIN et al., 2013).

No processo de modelagem hidrológica seria de se esperar que os parâmetros do modelo mudassem com a escala da bacia, visto que diferentes processos tendem a ser dominantes nas micro e macro escalas (FENICIA et al., 2008). Em microbacias, os processos que ocorrem na vertente (fluxos internos) tendem a controlar a resposta das vazões e são mais sensíveis às oscilações climáticas locais. Em grandes bacias hidrográficas a resposta em termos quantitativos está associada à interação entre sistemas aquíferos, planícies de inundação e a rede de drenagem, apresentando resposta mais lenta quando comparadas às microbacias (MENDIONDO & TUCCI, 1997; MERZ et al., 2009).

Quanto a hierarquização das bacias hidrográficas em relação à seu tamanho, não existe um consenso do meio científico que defina os limites dimensionais para o enquadramento das mesmas em categorias. Calijuri & Bubel (2006) adotam unidades hidrológicas e ecológicas para conceitualizar o termo microbacia hidrográfica. Para os autores, são áreas formadas por canais de 1ª e 2ª ordem e, em alguns casos, de 3ª ordem, representadas por áreas frágeis e frequentemente ameaçadas por perturbações.

Já Tucci (2003) aponta que os processos hidrológicos podem ser avaliados em cinco níveis es-

---

<sup>1</sup> - Núcleo de Engenharia de Água e Solo - Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG.

<sup>2</sup> - Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária - Escola Politécnica da USP

paciais diferentes: micro ( $< 10^4 \text{ km}^2$ ), transição  $\gamma$  ( $10^4 - 10^5 \text{ km}^2$ ), meso ( $10^5 - 10^6 \text{ km}^2$ ), transição  $\alpha$  ( $10^6 - 10^7 \text{ km}^2$ ) e macro ( $> 10^7 \text{ km}^2$ ).

Para Gibson et al. (2000) existem pelo menos quatro problemas teóricos relacionados à escala: (1) o efeito da escala, extensão e resolução sobre a identificação de padrões de mudanças ambientais; (2) como os fenômenos específicos variam entre os níveis escalares; (3) possibilidade de generalizar proposições derivadas de um nível para o outro; e (4) otimização dos processos em pontos e regiões particulares.

Da mesma forma, os principais desafios associados à análise escalar indicados por Mendiando & Tucci (1997) são: (1) representatividade dos processos hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais; (2) empirismo de modelos e parâmetros ao representar os processos hidrológicos na bacia hidrográfica e; (3) a integração de modelos meteorológicos e hidrológicos que atuam em escalas diferentes.

Atualmente existe uma gama de modelos hidrológicos que são aplicados para simulação e previsão de diversos cenários e sistemas hídricos baseados principalmente em estruturas conceituais ou físicas, discretizados desde níveis de sub-bacias, regiões hidrológicamente homogêneas até células associadas a características topográficas, principalmente. Dentre esses modelos, destaca-se o SWAT, acrônimo de língua inglesa para “Soil and Water Assessment Tool”.

O SWAT é um modelo conceitual que permite a análise de diferentes processos em bacias hidrográficas a partir de parâmetros espacialmente distribuídos em nível de sub-bacias e em caráter temporal contínuo operando em um passo de tempo diário. O modelo foi projetado para prever o impacto de alterações do uso e manejo do solo em bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas no tocante a quantidade e qualidade da água e produção de sedimentos (SRINIVASAN & ARNOLD, 1994).

Em termos de aplicação, o modelo SWAT vem sendo avaliado ao longo dos últimos anos no que tange ao processo de simulação hidrológica, principalmente em termos quantitativos, em diversas bacias com escalas espaciais distintas como demonstram os trabalhos de Migliaccio & Chaubey (2008), Paim & Menezes (2009), Xu et al. (2010), Durães et al. (2011), Opere & Okello (2011) e Cibir et al. (2013) para a macroescala, Birhanu (2009), Sexton et al. (2010), Lelis et al. (2012) e Andrade et al. (2013) para a mesoescala e, Green & Griensven

(2008), Arnold et al. (2010) e Pinto et al. (2013) para a microescala.

Dentro deste contexto, tomou-se como objetivo neste estudo avaliar o desempenho do modelo SWAT na simulação do escoamento ao nível micro e meso na escala espacial em uma mesma região hidrográfica verificando para quais parâmetros o modelo mostra-se mais sensível ao processo de simulação, além de testar o desempenho do algoritmo de calibração automática do modelo.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

Para avaliação de desempenho do SWAT em representar o escoamento, o processo de simulação foi aplicado em duas bacias hidrográficas: a do Ribeirão Jaguará, representando a mesoescala, e a do Ribeirão Marcela, representando a microescala.

Estas bacias são representativas da região do Alto Rio Grande que apresenta importância estratégica para geração de energia elétrica no sul de Minas Gerais visto que é a principal zona de recarga da bacia hidrográfica do Rio Grande.

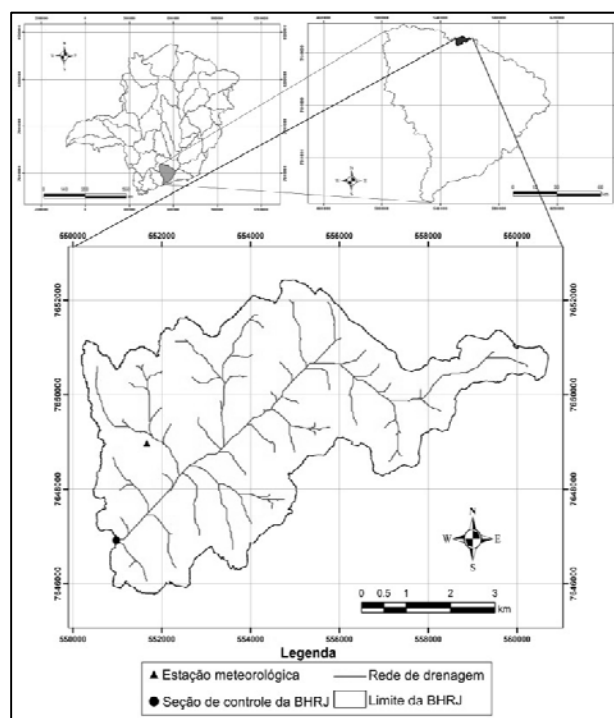


Figura 1 – Bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguará.

A bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguará (BHRJ) apresenta uma área de drenagem de 32km<sup>2</sup> e está localizada na região do Alto Rio Grande (Figura 1), desaguando diretamente no reservatório da Usina Hidroelétrica de Camargos sob a responsabilidade de operação da Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG (ANDRADE et al., 2013). O Ribeirão Marcela (Figura 2) é um afluente que deságua pela margem direita do Ribeirão Jaguará, sendo, portanto, uma sub-bacia da BHRJ. A área de drenagem desta sub-bacia (BHRM) é de 4,7km<sup>2</sup>.

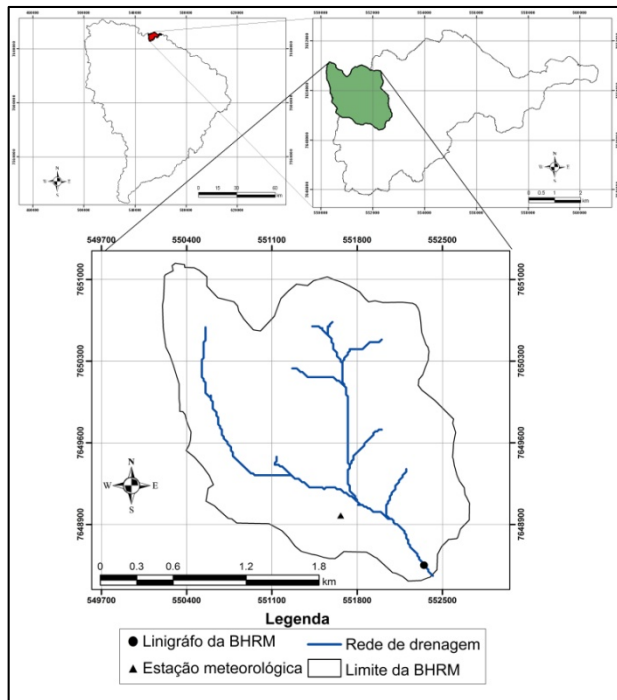


Figura 2 – Bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela.

O clima da região e das bacias em estudo, de acordo com a classificação de Köppen, é Cwa, caracterizado por verões amenos e úmidos e invernos frios e secos, com temperatura média anual de 19°C e precipitação média anual de 1500mm (MELLO et al., 2012).

Foram utilizadas cartas topográficas vetoriais do mapeamento sistemático disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na escala de 1:50.000. Tais cartas foram interpoladas para gerar o Modelo Digital de Elevação (MDE) permitindo gerar uma grade regular com resolução espacial de 15x15 metros, sendo esta a resolução empregada no estudo.

Para o monitoramento da vazão foram utilizados linígrafos automáticos com sensor de pressão para registro da lâmina d'água na seção de controle

de cada bacia registrando tais informações a cada 30 minutos. O dado de vazão diária foi obtido com a média dos valores registrados ao longo do dia utilizando-se de curvas-chaves determinadas para as referidas estações.

Os dados climáticos foram obtidos de uma estação meteorológica completa localizada em altitude representativa para ambas as bacias, com registro das informações a cada 30 minutos e posteriormente associadas ao intervalo diário compondo uma série de quatro anos hidrológicos (2006-2010). Foram monitorados dados de radiação solar, precipitação pluvial, temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

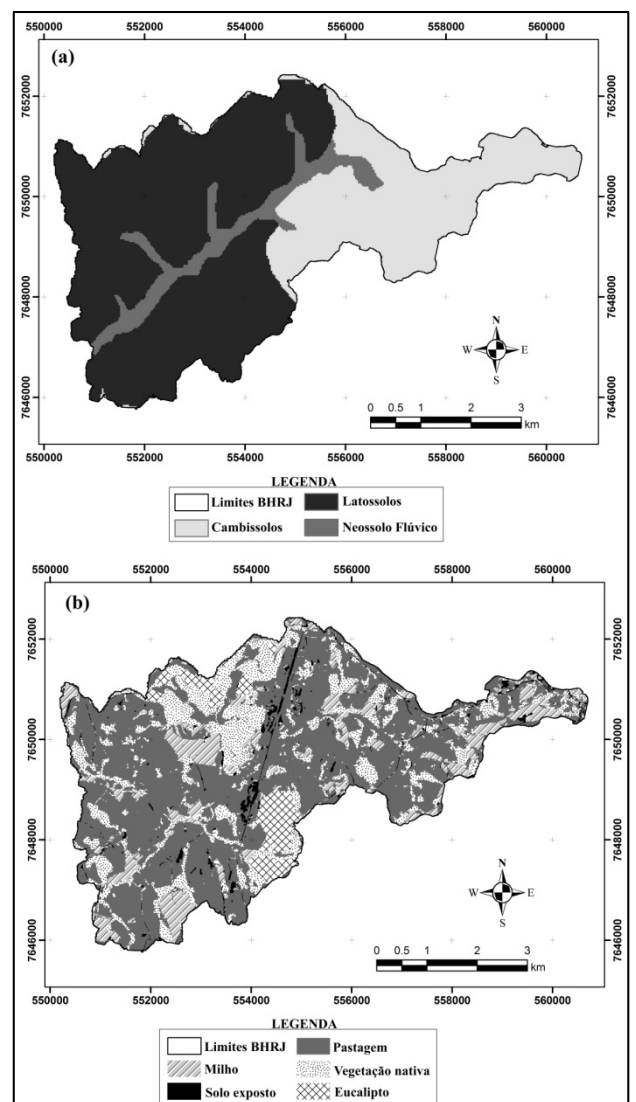


Figura 3 – Distribuição espacial das classes de solo (a) e do uso do solo (b) para a BHRJ.

Para o mapeamento do uso e ocupação do solo foram utilizadas duas imagens orbitais do satélite RAPIDEYE de 2010 com resolução espacial de 5 metros que foram empregadas para confeccionar um mosaico aplicado nos processos de segmentação e classificação supervisionada e posteriormente reamostrados para a resolução de 15x15 metros.

Como base para o mapa de classes de solo da BHRJ foi utilizado o trabalho desenvolvido por Araújo (2006). Para a BHRM foi utilizado o mapa de classes de solo desenvolvido por Motta et al. (2001).

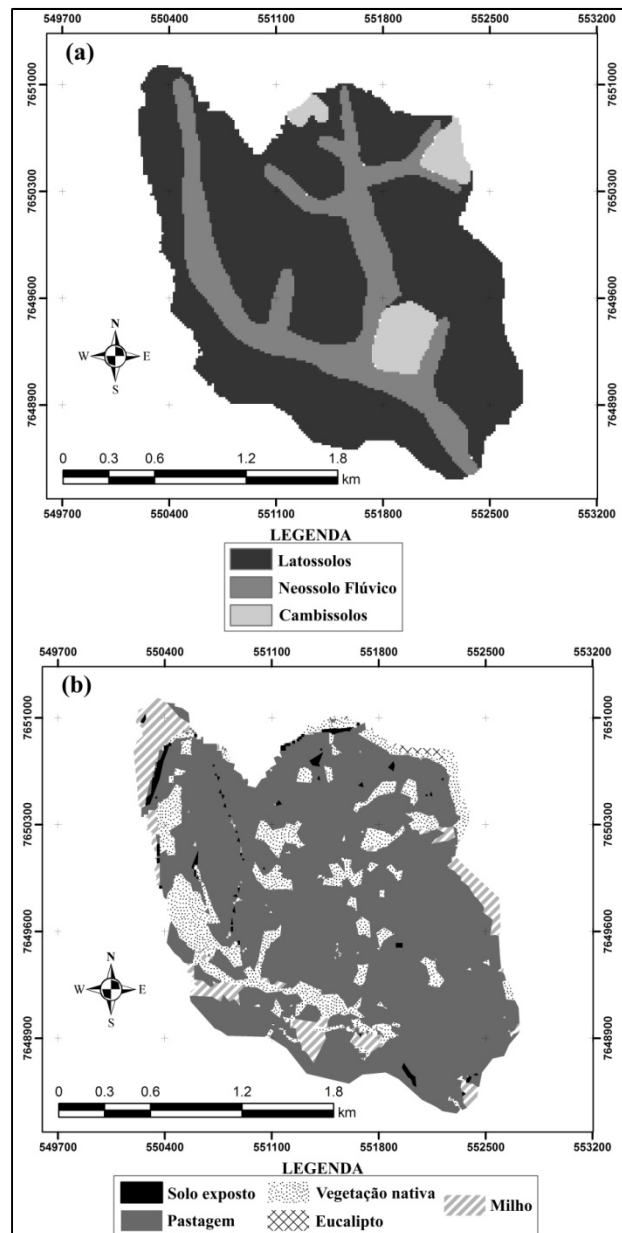


Figura 4 – Distribuição espacial das classes de solo (a) e do uso do solo (b) para a BHRM.

As classes de solo predominantes na BHRJ são: Latossolos ocupando 61,8% da área da bacia, Cambissolos (29,8%) e o Neossolo Flúvico (8,4%). A BHRJ apresenta altitudes entre 950 e 1070 metros e o relevo é considerado ondulado apresentando declividade média de 11,7%.

A BHRJ tem como característica marcante o desenvolvimento de atividades agrícolas, tendo com atividade predominante a pecuária extensiva sendo representada pela presença de pastagens (59,9%), seguida por milho (11,8%) e eucalipto (4,7%). A presença de 21,1% de vegetação nativa e de 2,5% de solo exposto indica uma possível fragilidade ambiental no tocante à erosão do solo, a qual é marcante na região. Na Figura 3 está apresentada a distribuição espacial das classes de solos (a) e do uso do solo (b) para a BHRJ.

Na BHRM observa-se o predomínio de Latossolos ocupando 71% da área, seguido do Neossolo Flúvico com 23% e por fim a presença de Cambissolos em 6% da área. As altitudes nesta bacia variam de 956 a 1051 metros, apresentando relevo ondulado com declividade média de 12,8%.

Em termos de uso e ocupação do solo na BHRM há um domínio do uso dedicado a pastagens (78,2%) seguido por vegetação nativa (14,7%), milho (5,9%), eucalipto (0,2%) e solo exposto (1,0%). Na Figura 4 estão apresentadas a distribuição espacial das classes de solo (a) e do uso do solo (b) na BHRM.

### O modelo SWAT

O modelo SWAT opera considerando quatro volumes de controle para estimativa do balanço hídrico: superficial, subsuperficial, aquífero raso e aquífero profundo. Na Equação 1, tem-se a representação do balanço hídrico admitido pelo SWAT.

$$SW_t = SW_{t-1} + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (1)$$

Em que:

$SW_t$  = armazenamento de água no solo no tempo  $t$  (mm);

$SW_{t-1}$  = armazenamento de água no solo no tempo  $t-1$  (mm);

$t$  = tempo (dias);

$R_i$  = precipitação (mm);

$Q_i$  = escoamento superficial (mm);

$ET_i$  = evapotranspiração (mm);

$P_i$  = percolação (mm);

$QR_i$  = fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

O SWAT requer informações para a simulação em três níveis de escala espacial: bacia hidrográfica, sub-bacias e Unidades de Resposta Hidrológica (URHs). De acordo com Zhang et al. (2009), o SWAT divide a bacia objeto de estudo em sub-bacias conectadas pela rede de drenagem e delinea as URHs com base em combinações únicas de classes de solo, declividade e cobertura do solo.

Neitsch et al. (2005) indicam que o SWAT simula com maior precisão o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica aplicando o conceito de URHs, pois o modelo calcula os fluxos para cada URH; em seguida, esses resultados são acumulados para gerar o balanço na sub-bacia; por fim, estes são direcionados para a rede de drenagem até atingirem a seção de controle.

No presente estudo, o critério utilizado para gerar as URHs foi o da área de drenagem maior ou igual a 10 hectares, onde as informações dominantes de classe e cobertura do solo e declividade foram utilizadas para alimentar o modelo.

O perfil do solo foi discretizado em camadas nas quais foram utilizados dados médios dos horizontes característicos de cada classe de solo com base em levantamentos realizados nas bacias. Os Latossolos e Cambissolos foram discretizados em três camadas e o Neossolo Flúvico em apenas uma ao longo do perfil do solo.

Foram selecionados os métodos Curva-Número (CAO et al., 2011) e Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) para representação dos processos de escoamento superficial direto e evapotranspiração, respectivamente, pelo modelo.

#### Análise de sensibilidade, calibração e validação

A análise de sensibilidade representa uma avaliação atribuída aos parâmetros aplicados na modelagem em função da qualidade de suas respostas em relação a um conjunto de dados observados. O modelo SWAT emprega em sua análise de sensibilidade dois métodos de avaliação que trabalham em conjunto (GRIENSVEN et al., 2006): o Latin Hypercube (LH) e o One-factor-At-a-Time (OAT). O modelo possui 20 parâmetros que podem influenciar no comportamento da vazão nas áreas estudadas estando estes expressos na Tabela 1.

Após a análise de sensibilidade deve-se proceder a calibração e validação do modelo. De acordo com Opere & Okello (2011) o processo de calibração envolve testes do modelo onde a partir dos dados de entrada os parâmetros são ajustados a fim de obter saídas semelhantes aos dados observados, enquanto que no processo de validação os valores

calibrados para os parâmetros são aplicados a um conjunto de dados independente dos utilizados na calibração a fim de verificar a qualidade da simulação.

**Tabela 1 – Parâmetros influentes no processo de simulação de vazão pelo SWAT nas bacias estudadas**

Parâmetro	Descrição
Alpha_Bf	Coefficiente de recessão do escoamento de base (dias)
Biomix	Eficiência de mistura biológica do solo
Blai	Índice de área foliar máximo ( $m^2.m^{-2}$ )
CANMX	Quantidade de água máxima interceptada pela vegetação ( $mmH_2O$ )
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal ( $mm.h^{-1}$ )
CH_N2	Número de Manning
CN2	Curva-Número inicial para umidade II
EPCO	Coefficiente de absorção de água pelas plantas
ESCO	Coefficiente de compensação de evaporação de água do solo
GwQmn	Limite de água no aquífero raso para ocorrência de fluxo de base ( $mmH_2O$ )
GW_Delay	Intervalo de tempo para recarga do aquífero (dias)
GW_Revap	Coefficiente de ascensão da água à zona saturada
Revapmn	Limite de água no solo para ocorrência da ascensão capilar à zona saturada ( $mmH_2O$ )
Slope	Declividade média da sub-bacia (mm)
SLSubBSN	Comprimento médio da encosta da sub-bacia (m)
Sol_ALB	Albedo do solo
Sol_AWC	Capacidade de armazenamento de água no solo ( $mmH_2O.mmsolo^{-1}$ )
Sol_K	Condutividade hidráulica saturada do solo ( $mm.h^{-1}$ )
Sol_Z	Profundidade da camada de solo (mm)
Surlag	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial (dias)

O modelo SWAT incorpora um procedimento de auto-calibração multi-objetivo baseado no algoritmo Shuffled Complex Evolution (SCE) que é empregado para obter um ajuste ótimo dos parâmetros utilizados na modelagem (GREEN & GRIENSVEN, 2008).

É recomendado deixar um período inicial do processo de simulação para o aquecimento do modelo visando estabilizar os valores dos parâmetros

calibráveis, pois ocorrem incertezas neste período que são representadas pelo desconhecimento das condições iniciais de vários processos na bacia (MELLO et al. 2008, CHIANG et al., 2010).

Para a BHRJ foi utilizado o período de 01 de setembro de 2007 a 31 de agosto de 2009 para calibração e de 01 de setembro de 2006 a 31 de agosto de 2007 para a validação, ambos com passo diário.

Para a BHRM foi utilizado na calibração o período entre 01 de setembro de 2006 a 31 de agosto de 2009 e para validação o período entre 01 de setembro de 2009 a 31 de agosto de 2010, ambos com passo diário.

No processo de calibração, para ambas as bacias, foram testadas três configurações de parâmetros: calibração automática com dez parâmetros (CA10), calibração automática com quatro parâmetros (CA4) e calibração manual com quatro parâmetros (Manual). No processo de validação foi utilizada a configuração que apresentou melhor eficiência estatística e valores dos parâmetros mais próximos da realidade física das bacias.

### Análises estatísticas

Para avaliar a qualidade de ajuste do modelo aos dados observados foi utilizado o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$  – Equação 2) (NASH & SUTCLIFFE, 1970) e o percentual de viés das vazões simuladas em relação às observadas ( $P_{bias}$  – Equação 3) (KUMAR, 2008).

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{OBS_i} - Q_{SIM_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{OBS_i} - \bar{Q}_{OBS})^2} \quad (2)$$

$$P_{bias} = \left( \frac{\bar{Q}_{SIM} - \bar{Q}_{OBS}}{\bar{Q}_{OBS}} \right) \times 100 \quad (3)$$

Em que:

$Q_{OBS_i}$  = vazão observada no dia  $i$  ( $m^3.s^{-1}$ );

$Q_{SIM_i}$  = vazão simulada no dia  $i$  ( $m^3.s^{-1}$ );

$\bar{Q}_{OBS}$  = vazão média observada ( $m^3.s^{-1}$ );

$\bar{Q}_{SIM}$  = vazão média dos dados simulados ( $m^3.s^{-1}$ ).

$n$  = número de eventos

Para o  $C_{NS}$  foi adotado o critério proposto por Green et al. (2006), onde valores a partir de 0,4 qualificam o ajuste como aceitável em aplicações da simulação hidrológica utilizando intervalos diários com o SWAT.

Van Liew et al. (2007) sugere para o  $P_{bias}$  a seguinte classificação em aplicações do SWAT utilizando intervalos diários:  $|P_{bias}| < 10\%$ , muito bom;  $10\% < |P_{bias}| < 15\%$ , bom;  $15\% < |P_{bias}| < 25\%$ , satisfatório e  $|P_{bias}| > 25\%$ , o modelo está inadequado.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O SWAT gerou para a BHRJ 1608 URHs que foram agregadas em 130 sub-bacias, enquanto que para a BHRM foram geradas 186 URHs, distribuídas em 19 sub-bacias.

A análise de sensibilidade indicou os parâmetros apresentados na Tabela 2 como os mais sensíveis e estes foram aplicados nas configurações de calibração aqui estudadas. Os parâmetros estão listados segundo a ordem de sensibilidade obtida e com o respectivo valor calibrado.

**Tabela 2 – Parâmetros e respectivos valores calibrados para a BHRJ e BHRM.**

BHRJ		BHRM	
Parâmetro	Valor calibrado	Parâmetro	Valor calibrado
<b>Calibração automática com 10 parâmetros (CA10)</b>			
Alpha_Bf	1,0	Alpha_Bf	0,99
CN2	-25,0%*	Sol_Z	-24,9%*
GwQmn	660,54 mm	GwQmn	680,6 mm
ESCO	0,84	ESCO	0,68
Sol_Z	-25,0%*	CN2	-25,0%*
Sol_AWC	23,2%*	Sol_AWC	25,0%*
CH_N2	0,0	Blai	0,21 $m^2.m^{-2}$
Blai	0,0 $m^2.m^{-2}$	Gw_Revap	0,029
CANMX	0,98 mm	CANMX	0,0 mm
Gw_Revap	0,036	Slope	24,9%*
<b>Calibração automática com 4 parâmetros (CA4)</b>			
Alpha_Bf	0,0	Alpha_Bf	1,0
CN2	-25,0%*	GwQmn	0,0 mm
GwQmn	0,0 mm	ESCO	0,0
ESCO	0,0	CN2	-25,0%*
<b>Calibração manual com 4 parâmetros (Manual)</b>			
Alpha_Bf	0,0115	Alpha_Bf	0,0115
CN2	-20,0%*	GwQmn	3,0 mm
GwQmn	3,0 mm	ESCO	0,50
ESCO	0,50	CN2	-20,0%*

\* O modelo calibra estes parâmetros com base em porcentagens variando seus valores iniciais em até 25% que estão em função da classe e uso do solo a que se referem.

Dos parâmetros indicados como mais sensíveis pelo modelo para ambas as bacias, a maioria representa o comportamento da água no solo, a exceção dos parâmetros CN2 e CH\_N2 que estão diretamente ligados ao escoamento superficial direto e dos parâmetros ESCO, Blai e CANMX os quais referem-se à evapotranspiração.

Esses parâmetros foram identificados como os mais sensíveis em diversos trabalhos científicos que verificaram o desempenho do modelo SWAT na simulação hidrológica em bacias hidrográficas brasileiras, destacando-se os de Durães et al. (2011), Lelis et al. (2012), Andrade et al. (2013) e Pinto et al. (2013) no Estado de Minas Gerais. Conforme Neitsch et al. (2005), em se tratando da calibração do SWAT, os parâmetros CN2, ESCO e Alpha\_Bf são de ajuste prioritário em se tratando da simulação do escoamento pelo modelo.

Percebe-se que os valores calibrados no processo manual são distintos dos obtidos pelo método automático em ambas as bacias. Isso ocorre pelo fato de que o algoritmo empregado pelo modelo busca uma otimização global da variável resposta estudada (escoamento) com base em uma função-objetivo que avalia o efeito de cada parâmetro no processo de simulação. Dessa forma, a seleção incoerente de um determinado valor para o parâmetro pode ser compensada pelo valor de outro parâmetro, provocando assim um efeito cascata de valores incoerentes em relação à realidade física das bacias (GREEN & GRIENSVEN, 2008). Esta situação foi observada principalmente para os parâmetros Alpha\_Bf e GwQmn nas configurações das calibrações automáticas em ambas as bacias.

Vale ressaltar também que apesar de ser descrito como um modelo hidrológico distribuído, o SWAT não permite que informações associadas principalmente aos atributos físicos do solo, sejam inseridas no modelo em caráter distribuído e sim sob a forma de valores médios, fato que afeta substancialmente a simulação do escoamento e, por conseguinte, do balanço hídrico nas bacias hidrográficas.

A afirmação anterior é comprovada à medida que o modelo indica o aumento ou redução dos valores dos parâmetros que representam características reais da bacia, tais como declividade (Slope), profundidade das camadas de solo (Sol\_Z), condutividade hidráulica do solo (Sol\_K) e armazenamento de água no solo (Sol\_AWC). Tal situação é admitida quando não se tem informações da área objeto de estudo ou em bacias não instrumentadas como explicitado por Cibir et al. (2013).

Seguindo esse raciocínio, a calibração manual torna-se eficiente à medida que permite ao hidrólogo inserir seus conhecimentos referentes à área em estudo e representar as características físicas da bacia de maneira mais acurada. Diante da dificuldade apresentada pelo modelo em fornecer valores condizentes com a realidade geomorfológica das bacias nos processos de calibração automática dos parâmetros foram utilizados como base para validação os valores dos parâmetros do processo de calibração manual.

O valor ajustado para o parâmetro Alpha\_Bf (0,0115) corresponde a 200 dias de recessão. Esse parâmetro foi de difícil calibração devido à característica particular exercida pelo fluxo subterrâneo tanto sobre a BHRJ quanto sobre a BHRM. Há ocorrência de alguns eventos chuvosos de cunho isolado nestas bacias ao longo dos meses do período considerado seco (maio a setembro) que não contribuem de maneira substancial com a recarga do aquífero raso, mas dificultam a identificação do período de recessão propriamente dito.

O parâmetro ESCO surge no modelo para corrigir uma deficiência conceitual em sua formulação. O SWAT admite que no primeiro centímetro 50% da demanda evaporativa é atendida e que aos 10 centímetros 95% dessa demanda é suprida. Esse conceito afeta o modelo gerando uma redução da evapotranspiração real haja vista que a demanda de água pela atmosfera não era atendida. O valor calibrado (0,50) indica que pelo menos 50% da demanda evaporativa do solo é atendida pelos centímetros superiores da camada, sendo o restante fornecido por camadas inferiores do solo.

O parâmetro GwQmn representa o limite inferior onde abaixo do qual não há escoamento base. O valor de três milímetros calibrado para ambas as bacias foi considerado representativo, visto que ele permite uma maior movimentação de água no perfil do solo e, conseqüentemente, maior contribuição para o fluxo de base. Esse parâmetro foi de difícil calibração devido à falta de indicações diretas nas bacias.

O parâmetro CN2 apresentou alta sensibilidade durante o processo de calibração manual nas duas bacias hidrográficas, tendo os seus valores iniciais reduzidos em 20%. O valor calibrado para a BHRJ variou entre 44 e 70 com valor médio representativo da bacia de 57, já para BHRM a faixa de variação foi a mesma, porém com média de 56. Por se tratarem de bacias estritamente agrícolas os valores são considerados adequados, entretanto, percebeu-se que quanto maior a discretização das bacias em subunidades a representação deste parâmetro

foi mais eficiente e o resultado da simulação apresentava melhoras significativas.

Na Tabela 3 estão expressos os resultados das estatísticas de precisão aplicadas para avaliar o desempenho do SWAT na simulação do escoamento para as áreas estudadas.

**Tabela 3 – Estatísticas de precisão resultantes da calibração e validação do SWAT para a BHRJ e BHRM.**

Bacia	Fase	$C_{NS}$	$P_{bias}$
BHRJ	AC10	0,71	-18,52
	AC4	0,54	-49,50
	Manual	0,58	9,41
	Validação	0,46	-7,73
BHRM	AC10	0,53	-13,58
	AC4	0,39	18,61
	Manual	0,25	19,73
	Validação	-1,37	28,12

Os valores do Coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ ) encontrados para as calibrações na BHRJ são considerados adequados de acordo com a classificação de Green et al. (2006). O  $C_{NS}$  é um índice estatístico que representa, principalmente, a resposta do modelo na simulação de vazões de pico (Andrade et al., 2013). As calibrações automáticas tiveram seu bom desempenho associado a uma maior flexibilidade na variação dos parâmetros permitida pelo modelo. Enquanto que a calibração manual apresentou um desempenho inferior à AC10, mas com desempenho satisfatório e com valores mais realistas dos parâmetros para a BHRJ. No tocante a validação o  $C_{NS}$  indicou um desempenho também satisfatório utilizando os parâmetros da calibração manual.

O  $P_{bias}$  indicou para a BHRJ uma superestimativa média de 9,41% das vazões observadas no processo de calibração manual e subestimativa de 7,73% na fase de validação. Van Liew et al. (2007) enquadra esses índices como de muito bom desempenho. Para as calibrações automáticas o desempenho foi considerado satisfatório na AC10 e não adequado para a AC4 com base na mesma classificação.

Na Figura 5 estão representados os hidrogramas observado e simulado bem como o hietograma para a BHRJ. Pode ser observada, nos hidrogramas, a dificuldade do modelo em representar a recessão após eventos com vazões de pico, onde há um retardamento do modelo em representar o decaimento da curva de recessão simulando um volume maior nesses períodos em relação à série observada. Este tipo de comportamento influenciou o

desempenho do índice  $P_{bias}$  que apresentou resultados melhores em comparação com o  $C_{NS}$ .

Sexton et al. (2010) encontrou valores de  $C_{NS}$  variando entre 0,42 e 0,58 na fase de calibração e de 0,54 a 0,76 na fase de validação para uma bacia com aproximadamente 50km<sup>2</sup> nos Estados Unidos empregando dados de radar e estações convencionais para simulação do escoamento. Lelis et al. (2012) também obtiveram resultados satisfatórios na simulação do escoamento em uma bacia de mesoescala com valores de  $C_{NS}$  entre 0,85 e 1,00.

O desempenho satisfatório verificado na mesoescala não foi observado na simulação do escoamento na microescala. A BHRM apresentou valores de  $C_{NS}$  satisfatórios para as calibrações automáticas, no entanto, os valores dos parâmetros não representam a realidade da bacia. Contudo, a calibração manual e a validação apresentaram desempenho inadequado. O índice  $P_{bias}$  indicou uma simulação satisfatória no período de calibração, porém inadequado para a fase de validação.

Na Figura 6 estão apresentados os hidrogramas observado e simulado além do hietograma para a BHRM. É possível observar forte superestimativa no período de recessão e de vários eventos de pico ao longo da série. Outro ponto a ser destacado é a magnitude das vazões observadas no ano hidrológico 07/08 que não apresentaram picos equivalentes aos outros anos da série. Nesse período as precipitações ficaram dentro da média, porém a sua distribuição foi mais uniforme, afetando vazões máximas extremas.

Os resultados obtidos para a BHRM confrontam os resultados obtidos por Pinto et al. (2013) que ao trabalhar em uma microbacia de cabeceira obtiveram  $C_{NS}$  de 0,81 e 0,79 para as fases de calibração e validação, respectivamente; e Green & Griensven (2008) que avaliaram o desempenho do SWAT em 6 microbacias e encontraram um  $C_{NS}$  variando entre 0,79 a 0,86 no processo de calibração automática e manual.

O SWAT foi desenvolvido com o propósito de representar o escoamento em bacias de médio e grande portes não instrumentadas. Em grandes bacias há uma amortização dos fenômenos hidrológicos associados à dinâmica da água no solo e são mais destacados os fenômenos de propagação do escoamento sobre a superfície e na rede de drenagem. Nas microbacias os fenômenos se processam de maneira mais instantânea com uma dinâmica maior, fato que pode ter provocado a instabilidade do modelo em representar o escoamento na BHRM. Um dos fatores que contribuíram para o desempenho não satisfatório do SWAT na simulação do es-



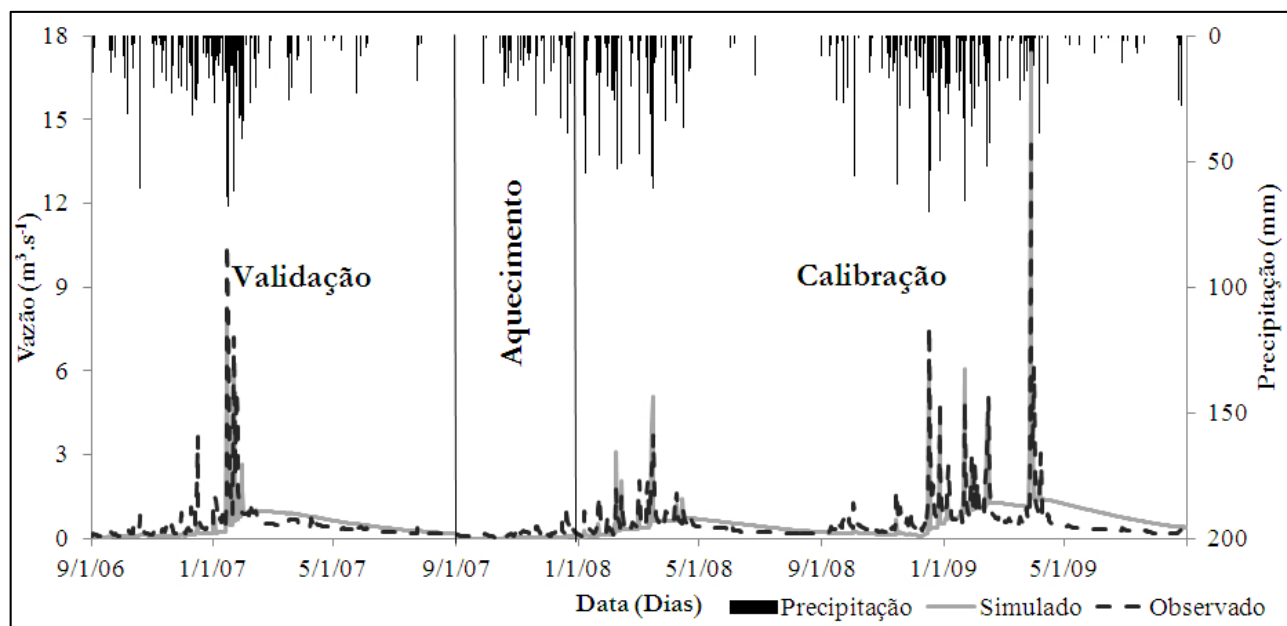


Figura 5 – Hidrogramas observado e simulado a partir dos parâmetros da calibração manual e hietograma para a BHRJ.

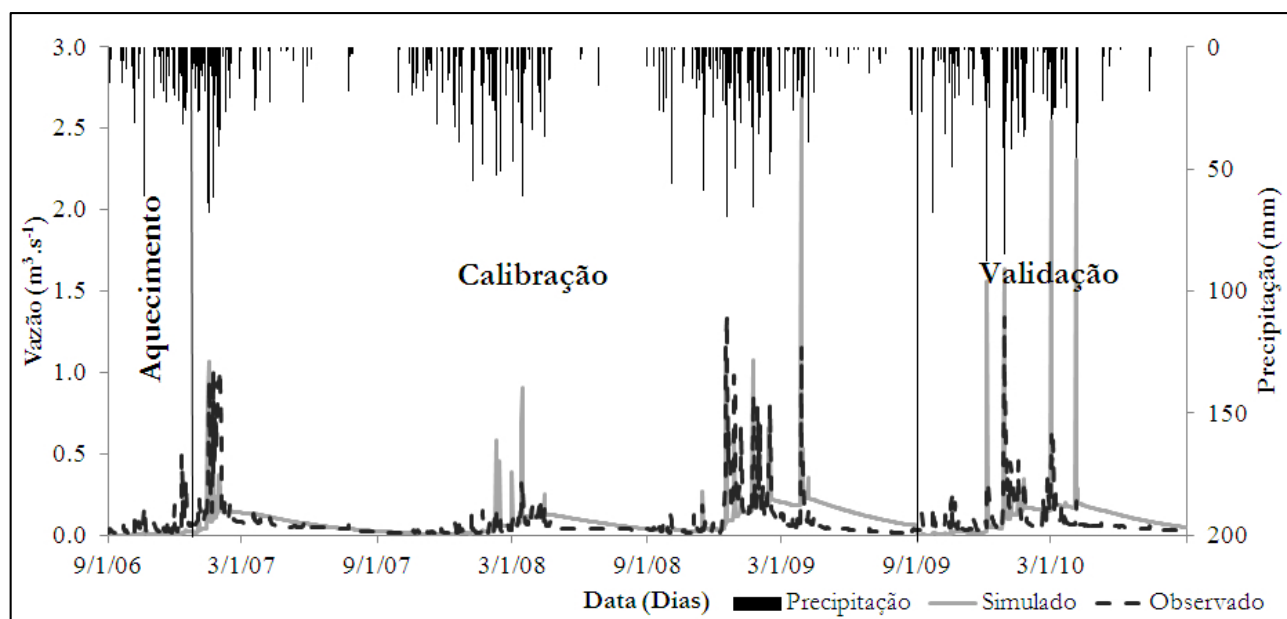


Figura 6 – Hidrogramas observado e simulado a partir dos parâmetros da calibração manual e hietograma para a BHRM.

coamento na BHRM pode ter sido o intervalo de tempo aplicado na simulação (diário). O tempo de concentração na BHRM é de aproximadamente 1 hora, caracterizando uma reposta muito rápida aos eventos de precipitação.

Outro ponto a ser destacado é a recomendação do método da Cuva-Número (CN) como for-

mulação padrão para representação do escoamento superficial direto pelo SWAT. No modelo as abstrações iniciais são consideradas fixas, fato este que dificulta a representação da recuperação da capacidade de infiltração das classes de solo podendo afetar diretamente Na qualidade do hidrograma simulado.

## CONCLUSÕES

O modelo hidrológico SWAT representou de forma satisfatória o escoamento para a bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguará conforme expressaram os índices estatísticos aplicados na análise de desempenho do modelo.

Em contrapartida, o SWAT não apresentou o mesmo desempenho expresso na mesoescala para a microescala. O modelo demonstrou-se deficiente na simulação do escoamento na microbacia hidrográfica do Ribeirão Marcela promovendo grandes desvios entre os dados observados e simulados.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 1998, 300 p.
- ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2013.
- ARAÚJO, A. R. *Levantamento de solos na bacia do Alto Rio Grande*. 2006. 268 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; VOLK, M.; WILLIAMS, J. R.; BOSCH, D. D. Assessment of different representations of spatial variability on SWAT model performance. *Transactions of the ASABE*, v.53, n. 5, p. 1433-1443, 2010.
- BIRHANU, B. Z. Hydrological modeling of the Kihansi river catchment in South Central Tanzania using SWAT model. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, v., n. 1, p. 1-10, 2009.
- CALIJURI, M. C.; BUBEL, A. P. M. Conceituação de microbacias. In: LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. (Org.). *As florestas plantadas e a água: implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento*. São Carlos: RiMA, 2006. 226 p.
- CAO, H.; VERVOORT, R. W.; DABNEY, S. M. Variation in curve numbers derived from plot runoff data for New South Wales (Australia). *Hydrological Processes*, v.25, p. 3774-3789, 2011.
- CHIANG, L.; CHAUBEY, I.; GITAU, M. W.; ARNOLD, J. G. Differentiating impacts of land use changes from pasture management in a CEAP watershed using de SWAT model. *Transactions of the ASABE*, v.53, n. 5, p. 1569-1584, 2010.
- CIBIN, R.; ATHIRA, P.; SUDHEER, K. P.; CHAUBEY, I. Application of distributed hydrological models for predictions in ungauged basins: a method to quantify predictive uncertainty. *Hydrological Processes*, v. 27, p. 1-13, 2013.
- DURÃES, M. F.; MELLO, C. R.; NAGHETTINI, M. Applicability of the SWAT model for hydrologic simulation in Paraopeba river basin, MG. *Cerne*, v. 17, n. 4, p. 481-488, 2011.
- FENICIA, F.; SAVENIJE, H. H. G.; MATGEN, P.; PFISTER, L. Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement. *Water Resources Research*, v. 44, n. 1, p. 1-13, 2008.
- GIBSON, C. C.; OSTROM, E.; AHN, T. K. The concept of scale and the human dimensions of global change: a survey. *Ecological Economics*, v. 32, p. 217-239, 2000.
- GREEN, C. H.; GRIENSVEN, A. V. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. *Environmental Modelling & Software*, v. 23, p. 422-434, 2008.
- GREEN, C. H.; TOMER, M. D.; DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. G. Hydrologic evaluation of the Soil and Water Assessment Tool for a large tile-drained watershed in Iowa. *Transactions of the ASABE*, v. 49, n. 2, p. 413-422, 2006.
- GRIENSVEN, A. V.; MEIXNER, T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; DILUZIO, M.; SRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, v. 304, n. 1, p. 10-23, 2006.
- LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O. 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.

- KUMAR, S. *Studying the effect of spatial scaling on hydrologic model calibration using soil and water assessment tool (SWAT)*. 2008. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Purdue University, West Lafayette, 2008.
- MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; YANAGI, S. N. M. Sea surface temperature (SST) and rainfall erosivity in the Upper Grande River Basin, Southeast Brazil. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 36, p. 53-59, 2012.
- MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M.; ACERBI JÚNIOR, F. W. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian head water basin. *Catena*, v. 75, p. 235-247, 2008.
- MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M. Escalas hidrológicas. II: Diversidade de processos na bacia vertente. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 2, n. 1, p. 81-100, 1997.
- MERZ, R.; PARAJKA, J.; BLOSCHL, G. Scale effects in conceptual hydrological modeling. *Water Resources Research*, v. 45, p. 1-15, 2009.
- MIGLIACCIO, K. W.; CHAUBEY, I. Spatial distributions and stochastic parameter influences on SWAT flow and sediment predictions. *Journal of Hydrologic Engineering*, p. 258-269, 2008.
- MOTTA, P. E. F.; CURI, N.; SILVA, M. L. N.; MARQUES, J. J. G. S. M.; PRADO, N. J. S.; FONSECA, E. M. B. *Levantamento pedológico detalhado, erosão dos solos, uso atual e aptidão agrícola das terras de microbacia piloto na região sob influência do reservatório da hidrelétrica de Itutinga/Carmargos-MG*. Lavras: UFLA/CEMIG, 2001. 51 p.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.
- NEITSCH, S. L. ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. *Soil and water assessment tool: theoretical documentation version 2005*. Temple: Blackland Research Center, 2005.
- OPERE, A. O.; OKELLO B. N. Hydrologic analysis for river Nyando using SWAT. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, v. 8, n. 1, p. 1765-1797, 2011.
- PAIM, J. B.; MENEZES, J. T. Estimativa do balanço sedimentar da bacia do Rio Tijucas (SC-Brasil) a partir da aplicação do modelo hidrológico SWAT. *Revista Geográfica Acadêmica*, v. 3, n. 2, p. 1-10, 2009.
- PINTO, D. B. F.; SILVA, A. M.; BESKOW, S.; MELLO, C. R.; COELHO, G. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) for sediment transport simulation at headwater watershed in Minas Gerais state, Brazil. *Transactions of the ASABE*, v. 56, p. 697-709, 2013.
- SEXTON, A. M.; SADEGHI, A. M.; ZHANG, X.; SRINIVASAN, R.; SHIRMOHAMMADI, A. Using Nexrad and rain gauge precipitation data for hydrologic calibration of SWAT in a northeastern watershed. *Transactions of the ASABE*, v. 53, n. 5, p. 1501-1510, 2010.
- SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Integration of basin-scale water quality model with GIS. *Water Resources Bulletin*, v. 30, p. 453-462, 1994.
- TUCCI, C. E. M. Processos hidrológicos e os impactos do uso do solo. In: TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. P. F. (Org.). *Clima e recursos hídricos no Brasil*. Brasília: ABRH, 2003.
- VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: a comparison on USDA-ARS watersheds. *Journal of Hydrological Research*, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.
- XU, H.; TAYLOR, R. G.; KINGSTON, D. G.; JIANG, T.; THOMPSON, J. R. Hydrological modeling of river Xiangxi using SWAT2005: A comparison of model parameterizations using station and gridded meteorological observations. *Quaternary International*, v. 226, p. 54-59, 2010.
- ZHANG, X. ; SRINIVASAN, R.; BOSCH, D. Calibration and uncertainty analysis of the SWAT model using genetic algorithms and Bayesian model averaging. *Journal of Hydrology*, v. 374, n. , p. 307-317, 2009.

## Hydrologic Scale Simulation With SWAT Model

### ABSTRACT

*Hydrological modeling is a useful tool for predicting water dynamic behavior in a given basin and therefore*

*a detailed estimate of the water balance is valuable information for water resources management. However, the phenomena governing the water cycle exhibit heterogeneous distribution, both in space and in time, which complicates their estimation. From this perspective, the purpose of this study was to evaluate the performance of the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model in the runoff estimated in two basins with different spatial scales. The model was applied to Jaguará Creek Watershed (JCW - mesoscale) and Marcela Creek Watershed (MCW - microscale), both with Latosols predominating in the region of Alto Rio Grande. Statistical indices were applied to evaluate the qualitative and quantitative accuracy of the model in the runoff simulation. The SWAT simulated the runoff for JCW satisfactorily presenting a Nash-Sutcliffe coefficient between 0.58 and 0.71 in the calibration phase and 0.46 in the validation phase. In contrast, the performance of the microscale model was inadequate, with statistical index values below the limits recommended in the literature.*

**Key-words:** *estimated flow, microscale, mesoscale, performance model.*