

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT PARA SIMULAÇÃO DA VAZÃO LÍQUIDA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BRAÇO DO NORTE – SANTA CATARINA¹

Morgana Giovanella de Farias^{2}; Ana Paula Esnidei Pereira³; Éverton Blainski⁴ Luis Hamilton Pospissil Garbossa⁵ & Adilson Pinheiro.⁶*

Resumo - Este trabalho teve como objetivo aplicar o modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) para escoamento superficial na bacia hidrográfica (BH) do Rio Braço do Norte, localizada no litoral Sul de Santa Catarina. O SWAT é um modelo matemático de avaliação contínua que simula processos físicos em BH's. Informações de relevo, solo, clima e uso do solo foram utilizadas para a simulação hidrológica na área de estudo. Inicialmente, realizou-se uma avaliação do desempenho do SWAT. Após a simulação inicial, identificou-se a necessidade de se realizar a calibração do modelo a fim de corrigir distorções entre dados medidos e simulados. A partir da análise da sensibilidade, feita pelo ArcSWAT, definiu-se os parâmetros prioritários a serem alterados e, a partir desses, procedeu-se a calibração do SWAT. Após eles serem manualmente alterados, obteve-se um coeficiente Nash de 0,82 que classificou o modelo como bom e adequado e um erro médio de $-0,26 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Posteriormente validado, o modelo mostrou-se eficiente e adequado para estudos hidrológicos na BH do Rio Braço do Norte.

Palavra-chave – SWAT, calibração, Braço do Norte.

CALIBRATION AND VALIDATION OF HYDROLOGICAL MODEL SWAT TO SIMULATE FLOW IN THE BRAÇO DO NORTE WATERSHED – SANTA CATARINA

Abstract - This paper aims to demonstrate an application of the hydrological model SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) in the study of surface runoff in the Braço do Norte Watershed, situated in the South of Santa Catarina State, Brazil. The SWAT is a mathematical model with a continuous evaluation that simulates physical processes in Watersheds. Topography data, along with weather, soil, use and management of soil were used to create the simulation in the study area. Initially, it was performed an evaluation of the efficiency of SWAT. After the initial simulation, it was identified the need to calibrate the model to correct some distortions between the simulated data and the measured ones. From the sensibility analyses made through the ArcSWAT, it was defined the most important parameters to be altered, and, with these, the calibration of the SWAT was initialized. After they were manually altered, the coefficient Nash of efficiency was 0,82 which classified the model as good and adequate and the Error was $-0,26 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. After validation, the model still shows itself efficient and adequate to hydrological studies in the Braço do Norte Watershed.

Keywords – SWAT, calibration, Braço do Norte.

¹ Trabalho realizado com recursos do CNPq, processo n° 562378/2010-3.

² Bacharel em Geografia. Bolsista de pesquisa do CNPq na Empresa de Pesquisa Agropecuária e de Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri). Email: mogiofarias@gmail.com.

³ Bacharel em Geografia. Bolsista de pesquisa do CNPq na Empresa de Pesquisa Agropecuária e de Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri). Email: esnidei@gmail.com

⁴ Dr. Engenheiro-agrônomo. Empresa de Pesquisa Agropecuária e de Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri). Centro de Informações Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (Ciram). Email: evertonblainski@epagri.sc.gov.br

⁵ Dr. Engenheiro civil. Epagri/Ciram. Email: luisgarbossa@epagri.sc.gov.br

⁶ Professor, Dr. Fundação Universidade Regional de Blumenau. Email: pinheiro@furb.br

INTRODUÇÃO

Os estudos ambientais em bacias hidrográficas têm ganhado importância em função da necessidade de se compreender a dinâmica do balanço hídrico, os processos que controlam o movimento da água e o transporte de sedimentos, além dos impactos de mudanças do uso do solo sobre a quantidade e qualidade da água. Nesse sentido, os modelos hidrológicos têm sido largamente empregados com o objetivo de representar matematicamente a dinâmica da água e sedimentos em bacias hidrográficas.

Os modelos hidrológicos podem ser definidos como representações matemáticas do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície ou subsuperfície terrestre, o que permite a simulação de processos físicos na sua dimensão temporal e espacial (Pullar e Springer, 2000). Entre os diversos modelos hidrológicos disponíveis, o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) se destaca por ser um modelo matemático de parâmetros distribuídos e contínuos (Arnold *et al.*, 1998) largamente utilizado no mundo (Gassman *et al.*, 2007) e no Brasil (Neto, 2011). Por meio do SWAT, diferentes processos físicos podem ser simulados, de forma sequencial (Rocha, 2013), com o objetivo de quantificar os impactos das alterações de uso do solo no escoamento superficial e subsuperficial, produção de sedimentos e qualidade de água (Neves, 2006).

O SWAT utiliza como dados de entrada o mapeamento e descrição de solos, uso e ocupação, mapa de relevo e dados característicos de tempo e clima. A partir dessas informações é possível realizar simulações de cenários passados, atuais e futuros, muitos desses ainda não testados em experimentos reais.

O SWAT tem se mostrado como uma ferramenta eficiente para a representação dos fenômenos físicos ocorridos durante o ciclo hidrológico através de formulações matemáticas (Lubitz, 2009). Dessa forma, sua aplicação pode servir tanto de base para estudos acadêmicos de pesquisa, como para a implantação de políticas públicas voltadas para o planejamento regional.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do modelo SWAT para a simulação do escoamento de água na BH Rio Braço do Norte e definir o potencial dessa ferramenta para o estudo de cenários alternativos de uso do solo e para sua utilização como ferramenta de definição de políticas conservacionistas.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na BH do Rio Braço do Norte (Figura 1) localizada na porção centro-sul do estado de Santa Catarina. A área de estudo possui uma área de 1.975 km² e é composta pelos municípios: Anitápolis, Santa Rosa de Lima, Rio Fortuna, Grão Pará, Braço do Norte e São Ludgero.

O clima da região foi classificado por Köppen como mesotérmico úmido com verões quentes (Cfa). A altitude varia de 39 a 1815 metros, sendo a maior altitude localizada na porção Oeste da bacia e as menores altitudes junto ao exutório do Rio Braço do Norte, ao Sul. As principais atividades da região são agricultura, bovinocultura e suinocultura.



Figura 1 – Mapa de localização da bacia e os pontos de monitoramento hidrológico utilizados como dados de entrada.

Base de dados

Os dados climáticos foram obtidos da estação meteorológica situada no município de Urussanga – SC. Esses dados foram utilizados para ajuste do gerador climático WXGEN (Meira Neto, 2011), necessário para o preenchimento de possíveis falhas na série de dados. Os dados diários de monitoramento de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento foram obtidos dessa mesma estação e interpretados pelo modelo no formato de tabelas. Os dados de precipitação diária, utilizados nas simulações, são provenientes das estações hidrológicas listadas na figura 1.

As informações cartográficas utilizadas como dados de entrada do modelo foram: relevo, mapa de uso e ocupação e mapa de solos. O relevo foi definido a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) 2000. A resolução espacial horizontal das informações é de 30x30 metros e o erro vertical de 20 metros. O mapa de solos foi gerado a partir do levantamento de reconhecimento de solos do Estado de Santa Catarina, escala 1:250.000 (Embrapa, 1998). O uso e ocupação das terras foi definido a partir de imagens de satélite de 2009, do serviço de navegação *online* BING. A interpretação e classificação do uso foi feita manualmente, por interpretação visual, através do software ArcGIS® 10, com base em critérios pré-determinados e relevantes a pesquisa.

Soil and Water Assessment Tool – SWAT

O SWAT é um modelo hidrológico desenvolvido com o objetivo de prever impactos que os variados tipos de usos do solo podem causar nos corpos hídricos, na perda de solos, no transporte de

nutrientes e agroquímicos em bacias hidrográficas (Neitsch *et al.*, 2009). O SWAT requer informações específicas sobre clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e o uso e ocupação do solo na área de estudo. Os processos físicos associados à dinâmica das águas, dinâmica dos sedimentos e ao crescimento de plantas são diretamente modelados pelo SWAT a partir do banco de dados inserido.

A utilização do SWAT neste trabalho foi feita através da extensão ArcSWAT 2005 vinculada ao Software ArcGIS® 9.3. Os dados anteriormente mencionados foram carregados no programa e após processados geraram uma simulação inicial que foi comparada com dados medidos no processo de calibração e validação.

Calibração e validação

A calibração e a validação do modelo foram realizadas utilizando dados de vazão medidos nos pontos de monitoramento descritos na Figura 1. A calibração do modelo SWAT acontece em quatro etapas: balanço de água e escoamento, sedimentos, nutrientes e pesticidas (Baldissera, 2005). Para o presente trabalho foi executada somente a calibração dos valores referentes a vazão líquida. Para tanto, buscou-se os dados de vazão da estação da ANA (Agência Nacional de Águas) localizada no município de Grão Pará (Figura 1). Na calibração foram utilizados dados diários de vazão da estação de Grão Pará, no ano de 2002 e para a validação utilizou-se dados desta mesma estação no ano 2004.

Para a verificação da eficiência do modelo utilizou-se de equações estatísticas como o Erro Médio (E_m) e o Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE), conforme equações 1 e 2:

$$EM = \sum_{i=1}^n \frac{E_{sim} - E_{med}}{n} \quad (1)$$

Onde: E_{sim} – vazão simulada; E_{med} – vazão média; n – número de dados da série.

$$COE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (E_{med} - E_{sim})^2}{\sum_t (E_{med} - E_m)^2} \quad (2)$$

Onde: COE - Coeficiente de Nash-Sutcliffe; E_{med} – vazão/nível observado; E_{sim} – vazão/nível calculado; t – tempo; E_m – média da vazão medida.

O Erro Médio determina o quanto que o modelo está superestimando ou subestimando a realidade (m^3s^{-1}). O COE é um dos métodos mais usados para avaliação de eficiência de modelos hidrológicos em geral (Lubitz, 2009). O modelo é considerado adequado e bom se o valor de COE supera 0,75, e é considerado aceitável se o valor de COE fica entre 0,36 e 0,75. Essas equações também servirão para que quando o modelo esteja calibrado se verifique a sua eficiência durante o processo de validação (Collischonn *et al.*, 2001).

A calibração é realizada quando os resultados da simulação inicial não atendem os objetivos do trabalho. Segundo Arnold (2000), o modelo SWAT é sensível a centenas de variáveis de entrada relacionadas à vegetação, uso do solo, solo, clima, aquíferos, canais e reservatórios. Dessa forma, o processo se iniciou com a análise de sensibilidade, onde foram determinados quais parâmetros possivelmente teriam maior influência no modelo quando alterados e consequentemente prioritários

para o ajuste do modelo. A eficiência da calibração foi realizada através do processo de validação. (Adriolo, 2008).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 2A são apresentados os resultados do comparativo entre vazão líquida medida e simulada pelo SWAT, para o ano de 2002, na seção controle de Grão Pará. Os resultados da análise de eficiência do modelo indicaram um COE de 0,68 e um EM = $-0,16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Apesar do desempenho do SWAT ser considerado aceitável, conforme Collischonn *et al.*, (2001) observou-se que algumas vazões simuladas foram superestimadas pelo SWAT (Figura 2A). A partir desses resultados procedeu-se a calibração do modelo.

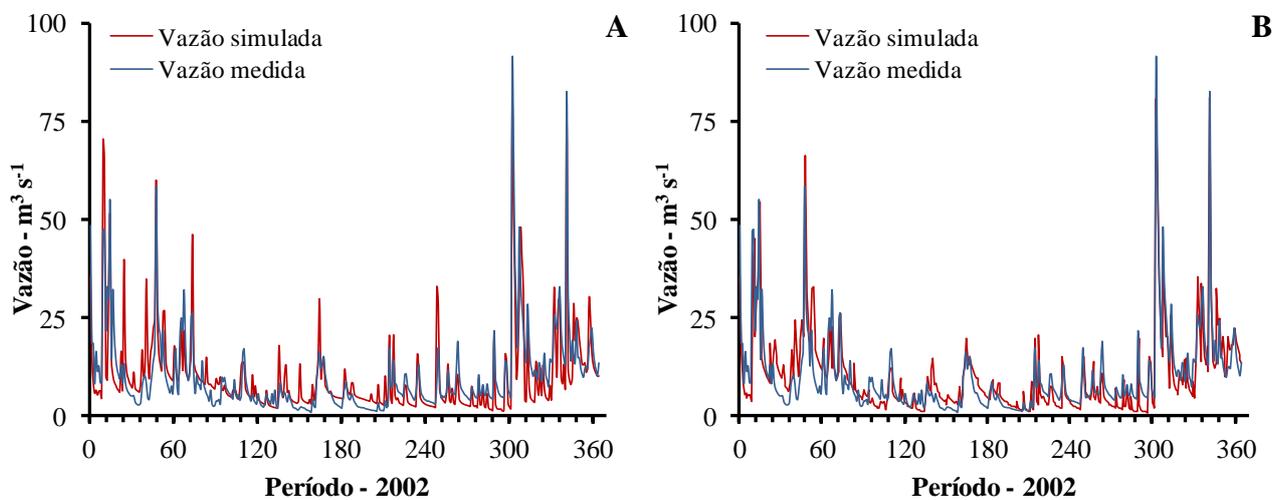


Figura 2 – Distribuição temporal de vazão diária medida e simulada pelo SWAT. A – antes da calibração (simulação inicial); B – Após a calibração.

O processo de calibração foi iniciado a partir da análise de sensibilidade dos parâmetros. Essa etapa foi realizada por meio do *software* ArcSWAT e os resultados são mostrados na Figura 3.

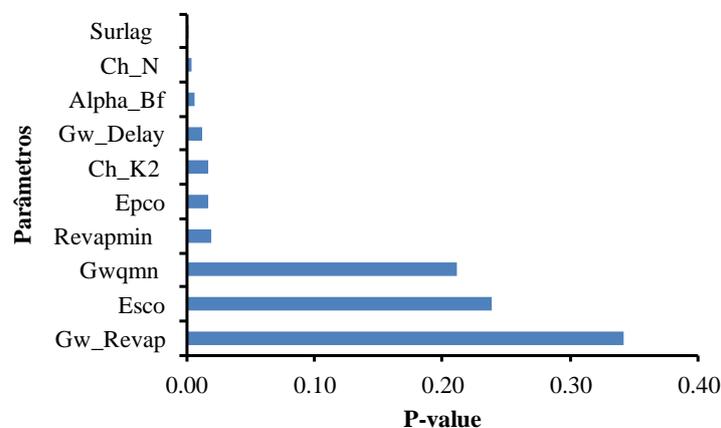


Figura 3 – Ranking dos parâmetros com maior sensibilidade para a variável vazão.

Os parâmetros com maior influência sobre a variável vazão líquida foram, respectivamente: Surlag – coeficiente de atraso do escoamento superficial (dias); Ch_N – coeficiente de rugosidade dos canais tributários; Gw_delay – atraso do escoamento água subterrânea (dias); Alpha_Bf – constante de recessão (dias); CH_K2 – efetividade da condutividade hidráulica do canal principal; EPCO – fator de compensação de retirada de água do solo pelas plantas; Revapmin – profundidade de água no aquífero para que ocorra percolação (mm).

O ajuste dos parâmetros listados anteriormente foi feito a partir das recomendações contidas no manual do modelo SWAT 2000. O melhor ajuste foi definido através da análise dos gráficos de vazão simulada e vazão medida e da análise do COE e do EM. Os parâmetros ajustados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros ajustados no processo de calibração do SWAT e resumo estatístico da calibração

Parâmetros	Surlag	Alpha_Bf	Gw_delay	Epc0	Revapmin	COE	EM
Inicial	6	0.048	31	1	0	0.68	-0.16
Calibrado	4	0.5	15	0.5	50	0.82	-0.27

Os parâmetros Surlag e Gw_delay referentes ao atraso de escoamento superficial e subsuperficial foram diminuídos, aumentando a eficiência do escoamento. Outra importante mudança foi no valor Alpha_bf, ou seja, aumentou-se a recarga do aquífero e, alterando o Revapmin aumentou-se a profundidade em que a água percola para o aquífero profundo. Com a diminuição no EPCO a retirada da água do solo pelas plantas é maior que a capacidade do sistema de compensá-la.

O COE alcançado pelo modelo calibrado está entre os valores que determinam a simulação como sendo adequada e boa, superando o valor alcançado antes do modelo ser calibrado. Na Figura 2B é possível identificar que os picos de vazão líquida diminuíram entre o período de 120 a 300 dias, tornando a simulação mais condizente com os valores medidos na estação de Grão Pará.

O processo de calibração é realizado com o intuito de se obter resultados de simulações que mais se assemelhe aos dados medidos (Stehr *et al.*, 2009). Nesse contexto, tanto a análise visual (Figura 2B) quanto o COE igual a 0,82, após a calibração, indicaram que as alterações realizadas no modelo acarretaram uma melhor representatividade dos fenômenos naturais associados a vazão líquida na BH. O EM, apesar de maior, encontra-se dentro dos limites citados na literatura.

A validação dos ajustes do modelo foi realizada através da comparação entre vazão líquida medida e vazão simulada (após calibração) para o ano de 2004, conforme Figura 4. A partir da análise da Figura 4 pode-se observar que o modelo representou satisfatoriamente o fluxo de água na BH. Apesar da variação entre dados medidos e simulados, o COE para vazão líquida diária foi de 0,71, classificado como adequado para estudos de simulação hidrológica.

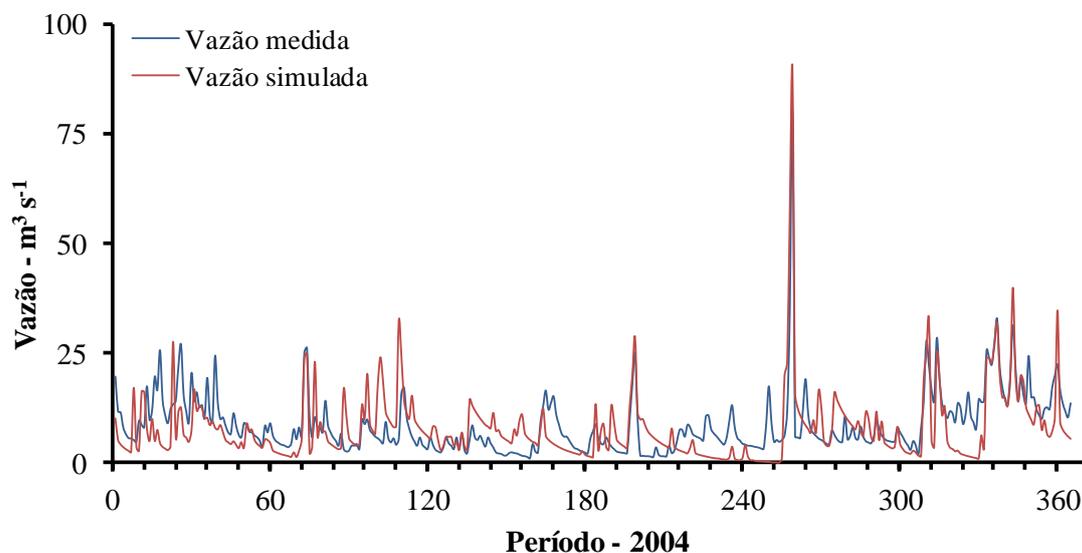


Figura 4 – Distribuição temporal de vazão diária medida e simulada pelo SWAT, durante o processo de validação do modelo, no ano de 2004.

CONCLUSÕES

O modelo SWAT mostrou-se eficiente para a simulação hidrológica na área de estudo, entretanto, fez-se necessária a calibração do modelo;

A análise de sensibilidade apontou os parâmetros adequados para a calibração do modelo e a alteração destes parâmetros permitiu que a simulação alcançasse um COE de 0,82 considerado adequado para a simulação hidrológica na BH do Rio Braço do Norte.

A validação do modelo mostrou que a calibração realizada foi adequada e o SWAT simulou satisfatoriamente a vazão líquida diária ao longo do período estudado.

REFERÊNCIAS

ADRIOLO, M. V. (2008) Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. In *Anais do VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas*. Belo Horizonte. Disponível em: [http://www.lhg.ufpr.br/arquivos/artigos_congresso/Andriolo_\(2008\)_Calibra%C3%A7%C3%A3o_modelo_SWAT_sedimentos.pdf](http://www.lhg.ufpr.br/arquivos/artigos_congresso/Andriolo_(2008)_Calibra%C3%A7%C3%A3o_modelo_SWAT_sedimentos.pdf). Acessado em 17 abr. 2013.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S. *et al.* (1998). Large area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model Development. *American Water Research Association* 34 (1-6), pp. 73-89.

ARNOLD, J.G.; MUTTIAH, R.S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P.M. (2000). “Regional estimation of base flow and groundwater recharge in Upper Mississippi river basin”. *Journal of Hydrology*, v.227, pp. 21-40.

BALDISSERA, G. C (2005). *Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica swat (soil and water assessment tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT*. Dissertação apresentada ao

Programa de Pós-Graduação de Física e Meio Ambiente da Universidade Federal de Mato Grosso para obtenção do título de Mestre em Física do Meio Ambiente. Cuiabá.

COLLISCHONN, W. (2001) *Simulação hidrológica em grandes bacias*. Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre: UFRGS. 194p.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisas de Solo (2006). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Embrapa Solos Rio de Janeiro 2.ed.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; ARNOLD, J. G. (2007). *The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, applications, and Future Research Directions*. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50 (4-4), pp. 1211 – 1250.

LUBITZ, E. (2009) *Avaliação da Aplicação do Modelo Hidrológico SWAT à Bacia do Ribeirão Concórdia – Lontras, SC*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental na Universidade Regional de Blumenau – FURB. Blumenau.

MEIRA NETO, A. A.; FONTES, A. S.; MEDEIROS, Y. D. P. (2011). Aplicabilidade do modelo SWAT a um sistema hidrológico complexo de clima semi-árido. In: *Revista Brasileira de Recursos Hídrico*. Disponível em: http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/8bdbed7821e6e982bf51367a74194826_516a562971bfee883e299245f6f6bedf.pdf. Acessado em: 18 abr. 2013.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. (2009). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model. In *Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Global Application*. n. 4. Org. por World Association of Soil and Water Conservation. Bangkok. – pp. 3 – 23.

NETO, J. de C. (2011). *Simulação hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados com modelo SWAT*. Dissertação de mestrado, curso de pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande – PB, 217 p.

NEVES, F. F.; SILVA, F. das G. B. da; CRESTANA, S. (2006). Uso do modelo AVSWAT na avaliação do aporte de nitrogênio (N) e fósforo (P) aos mananciais de uma microbacia hidrográfica contendo atividade avícola. *Eng. Sanit. Ambient.* Vol.11, n.4, pp. 311-317. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522006000400003&script=sci_arttext. Acessado em: 18 abr. 2013.

PULLAR, D.; SPRINGER, D. (2000). *Towards integrating GIS and catchment models, Environmental Modelling & Software*. Elsevier 15 (5-8), pp. 451-459.

ROCHA, E. de O. (2013). *Estudo ambiental integrado de processos hidrossedimentológicos e nutrientes na Bacia Hidrográfica do Rio Piranga utilizando o SWAT*. Dissertação de mestrado, curso de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa – 78p.

STEHR, A., DEBELS, P., ROMERO, F., ALCAYAGA, H. (2009) Hydrological Modeling with SWAT under conditions of limited Data Availability: Evaluation of Results from a Chilean Case Study. In *Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Global Application*. n. 4. Org. por World Association of Soil and Water Conservation. Bangkok. pp. – 267-284.