

SIMULAÇÃO HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA REPRESENTATIVA DE SUMÉ COM O MODELO SWAT

Itamara Mary Leite de Menezes Taveira¹; Vajapeyam S. Srinivasan²; Carlos de Oliveira Galvão³; Simone Danielle Aciole Moraes⁴; Mayara Jardim de Medeiros Silva⁴

RESUMO – O semiárido brasileiro é marcado pela escassez de recursos hídricos e alta variabilidade espacial e temporal das chuvas. A erosão da superfície do solo que elimina os nutrientes desta fina camada também é um problema sério. Sendo assim, o conhecimento adequado do comportamento hidrológico e sedimentológico é imprescindível para o gerenciamento dos recursos hídricos dessa região. A modelagem hidrossedimentológica em bacias hidrográficas ajuda na avaliação do potencial destas bacias. Neste sentido, dados disponíveis da Bacia Representativa de Sumé, localizada no semiárido paraibano, foram utilizados para calibração dos parâmetros do modelo hidrossedimentológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). O modelo calibrado foi utilizado para simulação. O desempenho do modelo foi avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2) e pelo fator de eficiência de Nash-Sutcliffe. Os resultados das simulações demonstraram que o modelo SWAT apresentou um bom desempenho na simulação do escoamento superficial, porém, devido à inexistência de dados medidos, seu desempenho na simulação sedimentológica pode ser avaliado apenas qualitativamente.

ABSTRACT – The semiarid region of Brazil is marked by the scarcity of water resources and irregular rains. The erosion of the thin surface soil is also a serious problem. For an adequate management of the soil and water resources of basins, runoff and erosion modelling would be a very useful tool. In this paper, the application of the SWAT model to the Representative Basin of Sumé in the semiarid region of Paraíba is presented, where in, the calibration of the model parameters and the use of the calibrated model in simulation of runoff and erosion are discussed. The model performance was evaluated utilizing the coefficient of determination R^2 and the Nash – Sutcliffe efficiency factor. The model SWAT proved to be quite efficient in simulating the runoff, but due to the lack of data on measured erosion, this aspect could only be evaluated qualitatively.

Palavras-Chave – Semiárido; Bacia Representativa de Sumé; Modelo SWAT.

¹Mestre em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal de Campina Grande - UFCG – e-mail: itamaramary@gmail.com.

²Professor Visitante Nacional Sênior, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, PE. e-mail: vajapeyam@yahoo.com

³Professor Adjunto da Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: galvao@dec.ufcg.edu.br

⁴Alunas de Iniciação Científica da UFCG – e-mail: aciole.simone@gmail.com e mayara-jardim@hotmail.com

INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro é marcado pela escassez de recursos hídricos e alta variabilidade espacial e temporal das chuvas. Sendo assim, o conhecimento do comportamento hidrológico é imprescindível para o gerenciamento adequado dos recursos hídricos dessa região. Além da intensa variabilidade climática, esta região também enfrenta intervenções antrópicas, que têm provocado um processo de degradação dos solos e da vegetação natural, acelerando os processos erosivos e consequentemente a desertificação de áreas susceptíveis a este fenômeno (Taveira, 2012). A erosão dos solos tem causas relacionadas à própria natureza, como a quantidade e distribuição das chuvas, a declividade, o comprimento e a forma das encostas, o tipo de cobertura vegetal e também a ação do homem, como o uso e o manejo da terra que, na maioria das vezes, tende a acelerar os processos erosivos (Guerra e Mendonça, 2004).

Os estudos hidrológicos em regiões semiáridas são de grande interesse à comunidade científica (Srinivasan et al., 2003). Neste contexto, as bacias experimentais foram instaladas no semiárido nordestino com o objetivo de servir como fonte de informações para estudos sobre os impactos das modificações do meio ambiente e para o conhecimento do comportamento hidrossedimentológico nessa região.

A modelagem hidrossedimentológica é uma ferramenta muito útil no manejo das bacias hidrográficas. Entretanto, Machado (2002) identifica como maior limitação na utilização dos modelos a dificuldade de manipular a grande quantidade de dados relacionados com a variabilidade espacial e temporal das características que descrevem a heterogeneidade do comportamento hidrológico. Além disso, dada a diversidade de modelos de base física e a dificuldade intrínseca para a calibração ou estimativa dos valores dos seus parâmetros, uma etapa fundamental no processo de quantificação dos impactos antrópicos é a parametrização adequada dos modelos para cada região/escala (Santos, 2009).

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) integrados aos modelos hidrológicos são empregados na criação do banco de dados para esses modelos, atenuando o problema de gerenciamento e manipulação de dados. Um dos modelos mais utilizados para simular os processos da erosão do solo e transporte de poluentes é o modelo hidrossedimentológico *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT, que pode ser acoplado a um ambiente SIG. O SWAT foi desenvolvido com o objetivo de estimar o impacto de diferentes práticas agrícolas na quantidade e qualidade da água, na perda do solo e carga de poluentes em uma bacia hidrográfica (Neitsch et al., 2005).

O trabalho de Carvalho Neto (2011) foi pioneiro na aplicação do modelo SWAT para uma bacia hidrográfica pequena, de aproximadamente 14 km², localizada no semiárido nordestino. O autor utilizou dois diferentes MDEs nas simulações: um gerado a partir da interpolação de dados de campo e outro obtido através de sensoriamento remoto. A parametrização e validação do modelo

foram realizadas em nível de sub-bacias, apontando um bom desempenho do modelo, conforme valores obtidos para R^2 e coeficiente de Nash-Sutcliffe.

O objetivo deste trabalho é a aplicação do modelo SWAT na Bacia Representativa de Sumé (BRS) localizada na parte superior da bacia do Rio Paraíba, no Estado da Paraíba, e avaliar seu desempenho em termos da simulação do escoamento superficial e da produção de sedimentos pela erosão.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

Na parte superior da bacia do rio Paraíba, Estado da Paraíba, está localizada a Bacia Representativa de Sumé (BRS), entre os municípios de Sumé e Monteiro (7°40' latitude Sul e 37°00' longitude Oeste), numa região de clima semiárido. A BRS ocupa uma área de aproximadamente 138,0 km², subdividida em três sub-bacias: Jatobá, Umburana e Gangorra, sendo que, as duas primeiras são sub-bacias da bacia de Gangorra (Figura 1 e Figura 2).

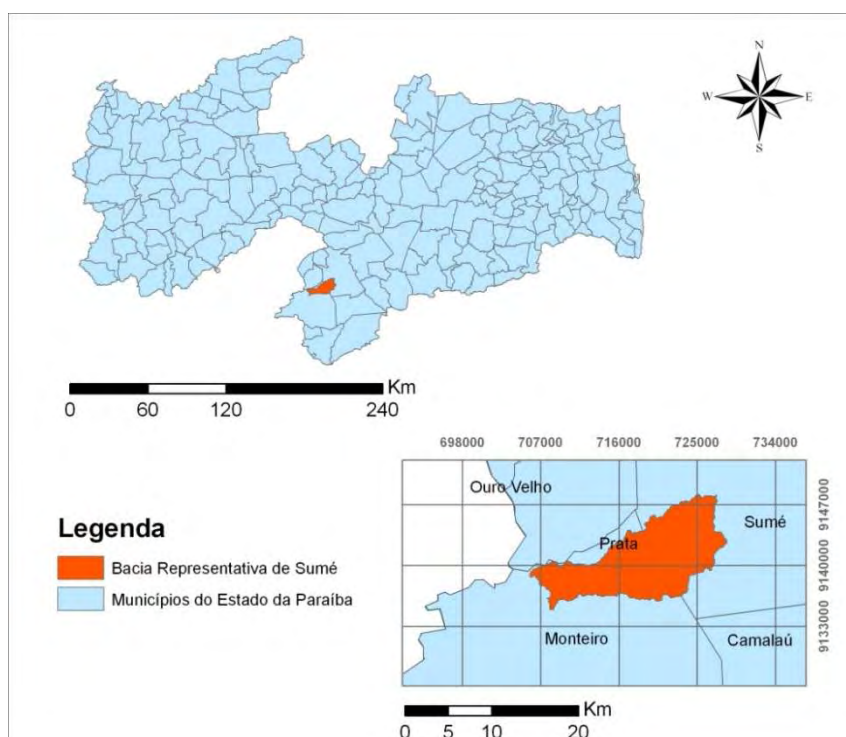


Figura 1 - Localização da Bacia Representativa de Sumé

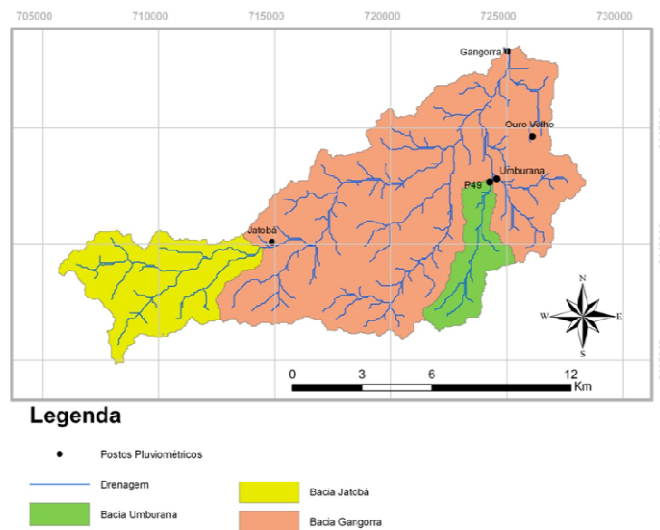


Figura 2 - Rede de drenagem e localização das sub-bacias e postos pluviométricos da BRS

O relevo varia de ondulado a pouco ondulado, com altitudes entre 536 e 794 m. A pedologia predominante encontrada na bacia é apresentada por Cadier e Freitas (1982): Luvissoilo Hipocrômico Órtico típico (TPo), Luvissoilo Crômico Órtico típico (TCo), Neossolo Litólico Eutrófico típico (RLe), Neossolo Flúvico Ta Eutrófico solódico (RUve) e o solo Cambissolo Háplico Tb Eutrófico típico (CXbe) (Figura 3).

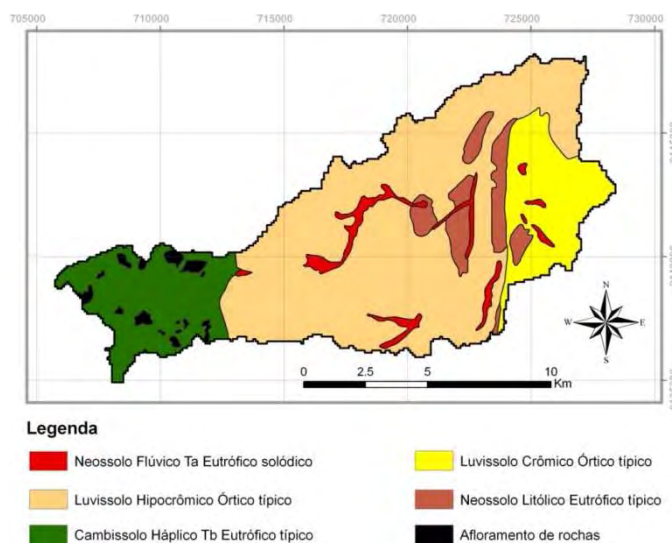


Figura 3 - Mapa pedológico da Bacia Representativa de Sumé (Fonte: Adaptado de Cadier e Freitas, 1982)

O modelo SWAT

O SWAT (Soil and Water Assessment Tool) é um modelo distribuído e contínuo que permite a simulação de vários processos físicos em bacias hidrográficas, com o objetivo de analisar os impactos e as alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água em bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas (Srinivasan e

Arnold, 1994). O SWAT é um software livre, desenvolvido pelo USDA-ARS (*United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service*). O SWAT incorpora fundamentos de vários modelos específicos que contribuíram de forma significativa para o seu desenvolvimento, sendo resultado direto do modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins), este desenvolvido a partir da integração dos modelos GLEAMS (*Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems*), CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*) e EPIC (*Erosion-Productivity Impact Calculator*).

As características básicas do modelo SWAT são apresentadas por Arnold *et al.* (1998):

- O modelo requer informações específicas sobre o clima, as propriedades do solo, a topografia, a vegetação e as práticas de manejo do solo que ocorrem na bacia hidrográfica. Os processos físicos associados ao movimento da água, movimento dos sedimentos, crescimento das culturas, ciclagem de nutrientes, entre outros, são diretamente modelados pelo modelo utilizando esses dados de entrada. Um aspecto positivo dessa característica do modelo é que foi desenvolvido para ser aplicado em bacias não monitoradas;
- É computacionalmente eficiente, podendo simular extensas bacias hidrográficas sem gastos excessivos de tempo;
- É um modelo contínuo, capaz de simular os efeitos das mudanças no uso e manejo do solo em longos períodos de tempo. Em alguns processos, os resultados apenas são obtidos após décadas de simulação. O modelo não foi desenvolvido para simular eventos isolados de precipitação;
- O modelo não requer calibração, caso não existam dados e informações disponíveis e de qualidade.

A bacia no SWAT é discretizada, com base no relevo, em sub-bacias; estas, por sua vez, são parametrizadas através das Unidades de Resposta Hidrológicas (Hydrologic Response Units – HRU's). Cada HRU corresponde a uma única combinação de uso da terra, solo e declividade. Subdividir a bacia em áreas contendo combinações únicas possibilita ao modelo considerar diferentes condições hidrológicas para diferentes usos.

A fase terrestre do ciclo hidrológico é simulada pelo modelo com base no balanço hídrico representado pela Eq. 1.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=1}^t (P_d - Q_{sup} - E_a - W_a - Q_{sub}) \quad (1)$$

em que são: SW_t Rede de drenagem e localização das sub-bacias e postos pluviométricos da BRS a quantidade de água no solo no fim do dia (mm); SW_0 a quantidade de água no início do dia (mm); t o intervalo de tempo (dias); P_d a precipitação no dia (mm); Q_{sup} o escoamento superficial

(mm); E_a a evaporação diária (mm); W_a a quantidade de água que entrou na zona vadosa no dia (mm) e Q_{sub} quantidade de água que alcança o aquífero subterrâneo (mm).

O modelo SWAT simula o volume do escoamento superficial para cada sub-bacia através do Método da Curva-Número, um método empírico desenvolvido pelo Soil Conservation Service – SCS. A produção de sedimentos é estimada no modelo SWAT através da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MEUPS) (Williams, 1975), Eq. 2.

$$sed = 1,18 (Q_{sup} \times q_{pico} \times A_{URH})^{0,56} \times K \times C \times LS \times P \times CFRG \quad (2)$$

sendo sed a produção de sedimentos após evento de precipitação no dia, em toneladas; Q_{sup} o escoamento superficial (mm); q_{pico} a vazão de pico do escoamento (m^3/s); A_{HRU} a área da Unidade de Resposta Hidrológica (ha); K a erodibilidade do solo [$(0,013 \text{ ton } m^2 \text{ hr})/(m^3 \text{ ton cm})$]; C é o fator de uso e manejo do solo (adimensional); LS o fator topográfico (adimensional); P o fator das práticas conservacionistas (adimensional) e $CFRG$ o fator de fragmentação esparsa (adimensional).

De acordo com Arnold et al. (1998), o escoamento é calculado para cada HRU e propagado para obter o escoamento total para a sub-bacia, o que aumenta a precisão das previsões e fornece uma melhor descrição física do balanço hídrico na bacia. A estrutura do modelo é baseada em comandos para propagar o escoamento, os sedimentos e os produtos agroquímicos pela bacia, sendo estes comandos organizados em oito componentes principais, que são: hidrologia, clima, sedimentos, temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas e manejo agrícola (Lopes, 2008).

O modelo ArcSWAT, utilizado neste trabalho, possui sua interface integrada ao SIG (Sistema de Informações Geográficas), no qual o processo de modelagem se dá inicialmente através da inserção de dados relacionados às características físico-climática da bacia, que correspondem aos planos de informação cartográficos (PIs) e aos dados alfanuméricos. A partir da inserção do Modelo Digital de Elevação se obtém a rede de drenagem e é possível realizar a delimitação e discretização da bacia em sub-bacias. Já a sobreposição do mapa de uso e cobertura do solo, do mapa pedológico e das classes de declividade da bacia permite a formação das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs).

Dados de entrada

Os dados de entrada no modelo SWAT correspondem aos planos de informação cartográficos (PIs), representados pelo Modelo Digital de Elevação, mapa de uso e ocupação do solo, o mapa pedológico, dados climatológicos e hidrológicos e os parâmetros do solo.

Modelo Digital de Elevação

A delimitação da bacia hidrográfica é realizada de forma automática, a partir dos modelos Digitais de Elevação. Foi utilizado neste trabalho um MDE gerado pelo projeto TOPODATA (Valeriano, 2004), que oferece dados topográficos e suas derivações básicas em cobertura nacional, ora elaborados a partir dos dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), refinados para a resolução espacial de 30m através da técnica de “krigagem”.

Uso e ocupação do solo

A partir da investigação visual detalhada e a classificação supervisionada de uma cena do satélite LANDSAT 5 (órbita 215, ponto 65, sensor TM), com data de passagem de 17 de junho de 1984, identificaram-se as principais classes de ocupação e uso do solo para a bacia, de acordo com metodologia utilizada no trabalho de Almeida (2011). O mapa produzido é considerado foto-interpretativo e o software utilizado para a classificação foi o SPRING, desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (Figura 4).

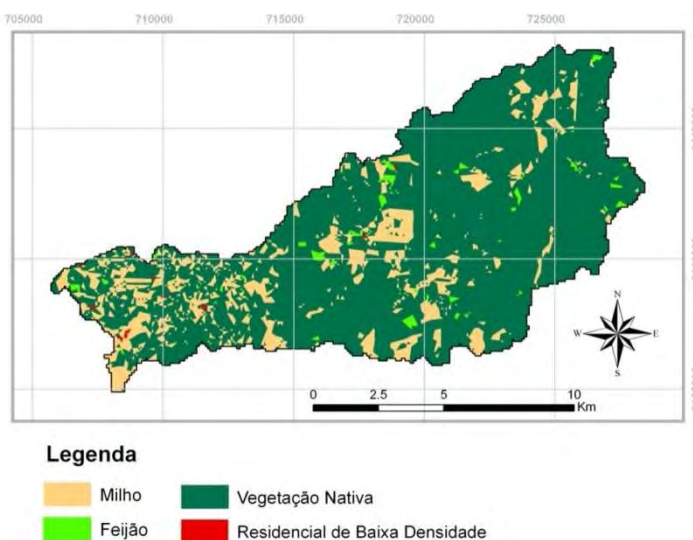


Figura 4 - Mapa de uso e ocupação do solo da BRS

Pedologia

O mapa de solo foi digitalizado a partir de material físico disponível no relatório de Cadier e Freitas (1982) e transformado no formato shapefile (Figura 3). O modelo SWAT possui em sua interface ArcSWAT um banco de dados com as características físico-hídricas dos solos dos Estados Unidos. Portanto, foi necessário adicionar a este banco de dados as classes de solos presentes na Bacia Representativa de Sumé e seus respectivos parâmetros.

Os parâmetros de solo necessários referem-se ao grupo de saturação, a profundidade de raiz, porosidade, densidade aparente, água disponível no solo, condutividade hidráulica saturada e albedo. Alguns dados são específicos para cada camada de cada tipo de solo: profundidade da

camada, erodibilidade, carbono orgânico e percentagem de argila, silte, areia e seixo. Todos estes dados foram obtidos a partir do Levantamento Exploratório e Reconhecimento de Solos da Paraíba (Ministério da Agricultura, 1972), dos trabalhos de Lopes (2003) e Carvalho Neto (2011) e inseridos diretamente no banco de dados do modelo.

Dados climáticos

O modelo SWAT necessita de dados diários de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Devido à ausência de dados diários de temperatura, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa, estes foram gerados pelo SWAT, utilizando o gerador climático WXGEN (Sharpley e Williams, 1990), tendo como referência os dados mensais da estação climatológica de Ouro Velho.

Os dados diários de pluviometria foram obtidos das estações pluviométricas de Umburana, Jatobá e Gangorra, correspondem ao período de 1976 a 1979, adquiridos do relatório de Cadier e Freitas (1982); estas estações são apresentadas no mapa da Figura 2. Os dados de lâmina escoada para a Bacia Representativa de Sumé e para as sub-bacias de Umburana e Jatobá foram adquiridos do relatório de Cadier e Freitas (1982), bem como os eventos individuais.

Parametrização do modelo

A parametrização é a fase da simulação do modelo onde os parâmetros devem ser determinados e a validação é a simulação do modelo com os parâmetros estimados, onde se verifica a validade do ajuste realizado (Tucci, 2005). Para a parametrização de um modelo deve-se separar uma série temporal de dados medidos em dois períodos, um para calibração e outro para validação. Porém, neste estudo, devido à reduzida série de dados, toda ela foi utilizada para a calibração do modelo. Em seguida, foi verificada a consistência dos parâmetros estimados para a BRS nas sub-bacias de Umburana e Jatobá; para estas há uma série de dados medidos que correspondem ao período dos dados utilizados na calibração.

Parâmetros adotados

A fim de representar da melhor forma possível a área de estudo, os parâmetros que governam a quantidade de água que recarrega os aquíferos foram ajustados. Diante da inexistência de aquíferos, este processo foi levado ao mínimo possível, e permite a ascensão pela franja capilar de toda a água que adentra a zona vadosa, antes que seja possível a recarga subterrânea, e pode ser consumida pelos vegetais e/ou estar disponível para evaporação do solo através do processo REVAP.

Os parâmetros relacionados a este processo que foram modificados são: (a) ALPHA_BF, que é o fator do fluxo de base que determina o número de dias para que o fluxo subterrâneo atinja o canal, sendo adotado para este parâmetro o valor 0, anulando assim a recarga de base; (b) GW_REVAP, que trata-se do coeficiente de “REVAP”, sendo adotado o seu valor máximo de 0,2 promovendo, desta forma, uma ascensão de água conforme a evapotranspiração potencial; (c) REVAPMN, parâmetro que determina o valor limite a ser superado pela lâmina que percola para favorecer o processo de “REVAP”; adotou-se, portanto, o valor 0, indicando que toda a água que percola está passível do processo “REVAP”; e (d) RCHRG_DP, que é a fração do que percola e abastecerá o aquífero subterrâneo profundo, sendo adotado o valor 0.

O coeficiente de Manning para os canais foi adotado de acordo com os estudos de Figueiredo (1998) nesta mesma área como sendo 0,033, tanto para o canal principal quanto para os tributários, que corresponde, segundo Porto (2006), ao coeficiente de rugosidade de Manning para rios com meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos, com vegetação e pedras em condições muito boas.

Parâmetros calibrados

Fixados os parâmetros supracitados, os outros parâmetros do modelo que controlam o escoamento superficial, foram ajustadas até que a lâmina escoada calculada pelo modelo se aproxime da lâmina escoada observada em campo. A parametrização realizada por Carvalho Neto (2011) para as sub-bacias da Bacia Experimental de São João do Cariri com o modelo SWAT, resultou na calibração satisfatória do coeficiente de evaporação do solo (ESCO). No presente trabalho, além do parâmetro ESCO, outros parâmetros foram utilizados no processo de calibração. Tais parâmetros foram sensíveis na simulação do escoamento superficial. Na calibração destes parâmetros levou-se em conta a experiência dos outros pesquisadores como: Baldissera (2005); Cibin et al. (2010) e Machado et al. (2003) o que está resumida a seguir:

- ESCO: coeficiente de compensação da evaporação do solo, podendo variar entre 0,001 e 1;
- SOL_AWC: água disponível no solo, com valores máximos e mínimos de 0 a 1 mm/mm respectivamente;
- CN2: valor de curva número da umidade na condição II;
- SURLAG: coeficiente de retardo do escoamento, podendo variar no intervalo de 1 a 24 dias;
- LAT_TIME: tempo de retorno do fluxo lateral variando no intervalo de 0 a 180 dias; e
- SOL_K: condutividade hidráulica saturada assume os valores de 0 a 2000 mm/h.

Os valores de condutividade hidráulica saturada só foram calibrados para os solos Cambissolo Háplico Tb e Neossolo Flúvico Ta Eutrófico solódico. Os demais solos já se encontravam com

valores bem definidos na literatura e em seu limite. Foi necessário também um ajuste no intervalo de classes de declividade, com o intuito de melhor representar a área estudada e o processo de escoamento superficial. Desta forma, as cinco classes de declividade adotadas tiveram seus intervalos modificados para: 0 a 4%, 4 a 8%, 8 a 12%, 12 a 16% e acima de 16%.

Índices de ajuste

Os índices de ajuste, incluindo o coeficiente de determinação (R^2) e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE), foram utilizados para analisar a relação entre os dados simulados pelo modelo e observados em campo nos processos de calibração e verificação da consistência. O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) é dado pela equação:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E})^2}$$

onde COE é o coeficiente de Nash-Sutcliffe; E_m é o evento observado; E_s é o evento simulado; $\bar{E}$ é a média do evento observado e n o número de eventos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Delimitação e Discretização

A delimitação da BRS resultou em uma área de 138,44 km². As delimitações das duas sub-bacias principais de Umburana e Jatobá resultaram em áreas de 10,63 e 26,12 km², respectivamente (Figura 5 e 6). As características morfométricas da BRS e das sub-bacias podem ser observadas na Tabela 1.

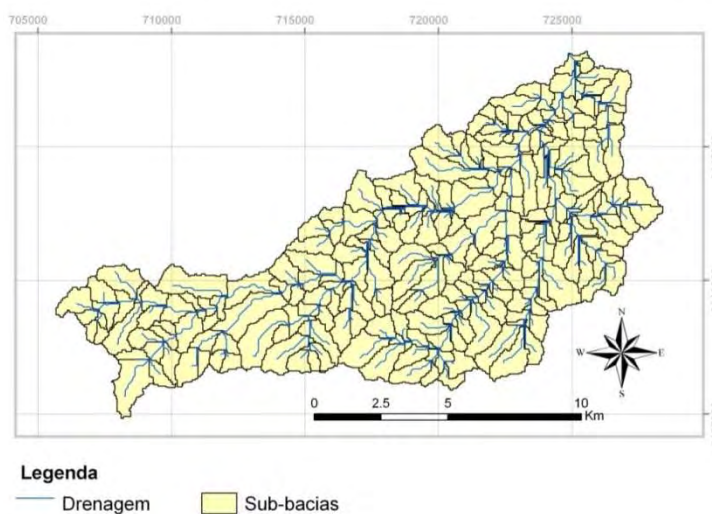


Figura 6 – Discretização pela rede de drenagem da Bacia Representativa de Sumé

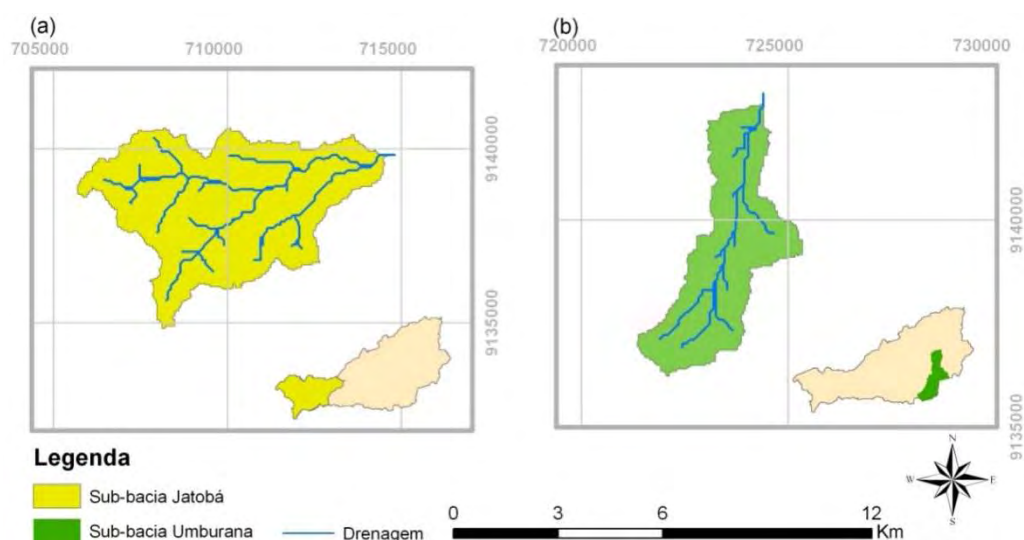


Figura 7 - Discretização das sub-bacias pela rede de drenagem :(a) Jatobá e (b) Uburana

Tabela 1 - Características morfométricas da BRS

Parâmetros morfométricos	BRS	Jatobá	Uburana
Área (km ²)	138,4	26,12	10,63
Perímetro (m)	93240	36960	2442
Elevação máxima (m)	794	794	647
Elevação mínima (m)	536	603	557
Elevação média (m)	602,8	659,9	594,01

Unidades de Resposta Hidrológica

Na composição das HRUs, deve-se ressaltar que o uso do solo correspondente à residencial de baixa densidade, classificado no mapa de uso e cobertura do solo (Figura 4), foi descartado, devido a sua área nas HRUs ser inferior ao nível de sensibilidade adotado (15%). As informações utilizadas na composição das HRUs para a BRS e para as sub-bacias são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Critérios para a Composição das HRUs

		BRS		Jatobá		Umburana	
		Área (km ²)	% da área	Área (km ²)	% da área	Área (km ²)	% da área
Cobertura do solo	Vegetação Nativa	117,32	84,74	16,86	64,56	9,92	93,36
	Cultura de milho	20,55	14,85	9,26	35,44	0,65	6,10
	Cultura de feijão	0,57	0,41	-	-	0,06	0,54
Tipo de solo	Luvisso solo Hipocrômico Órtico	84,31	60,90	2,38	9,14	5,61	52,73
	Luvisso solo Crômico Órtico típico	18,80	13,58	-	-	1,82	17,17
	Neossolo Litólico Eutrófico típico	8,42	6,08	-	-	2,84	26,76
	Neossolo Flúvico Eutrófico solódico	3,18	2,30	-	-	0,36	3,36
	Cambissolo Háplico	21,98	15,88	21,98	84,15	-	-
	Afloramento de rochas	1,75	1,26	1,76	6,72	-	-
Intervalo de declividade	0 a 4%	72,32	50,82	11,95	45,75	6,15	57,85
	4 a 8%	47,10	33,10	7,69	29,43	3,59	33,75
	8 a 12%	18,24	12,82	3,60	13,77	0,76	7,20
	12 a 16%	0,659	0,46	0,08	0,33	0,013	0,13
	16% a ∞	3,982	2,80	2,80	10,72	0,11	1,08

Parametrização na BRS

Um ajuste da lâmina escoada foi possível quando se adotou a seguinte combinação de parâmetros: ESCO = 0,1; SOL_AWC = 0,4 mm/mm; CN₂ = 73; SURLAG = 8 dias; SOL_K = 40 mm/h para solos Neossolo Flúvico Ta Eutrófico solódico e 15 mm/h para o solo Cambissolo Háplico Tb. O parâmetro LAT_TIME não apresentou sensibilidade, e logo foi considerado nas simulações o seu valor de *default* igual a 31 dias.

Observou-se uma superestimação da lâmina escoada para o ano de 1979; cabe ressaltar que este ano representou um ano de estiagem, com baixa pluviometria, o que deve ter impossibilitado um melhor ajuste do modelo para as vazões de baixa magnitude; a vazão simulada para este ano não atingiu um valor de COE favorável (Tabela 3). Este fato pode ser observado também na Figura 8, na qual estão dispostas as lâminas escoadas observadas para a BRS e as lâminas escoadas calculadas pelo modelo. Observa-se também nesta figura que há uma similaridade no comportamento da precipitação e as vazões observadas e simuladas com periodicidade mensal.

Deve-se ressaltar que para as lâminas escoadas observadas de até 1 mm houve uma subestimação do escoamento e o modelo não gerou escoamento na maioria dos casos. Esta subestimação foi também constatada por Uzeika (2009) e Carvalho Neto (2011) para a maioria dos eventos de baixa magnitude. Tal diferença pode ser atribuída para a variação da taxa de infiltração durante os eventos que o método de Curva Número não consegue representar adequadamente. Vale lembrar que a utilização do Método da Curva Número para estimar o escoamento superficial não

leva em consideração a intensidade e a duração da chuva, mas apenas o volume diário precipitado, como relatam Saleh e Du (2004).

Tabela 3 - Desempenho do modelo para o período de 1976 a 1979

Ano	Excluídos meses sem escoamento	
	R ²	COE
1976	0,9913	0,8945
1977	0,9945	0,9932
1978	0,9959	0,9960
1979	0,8045	-2,57

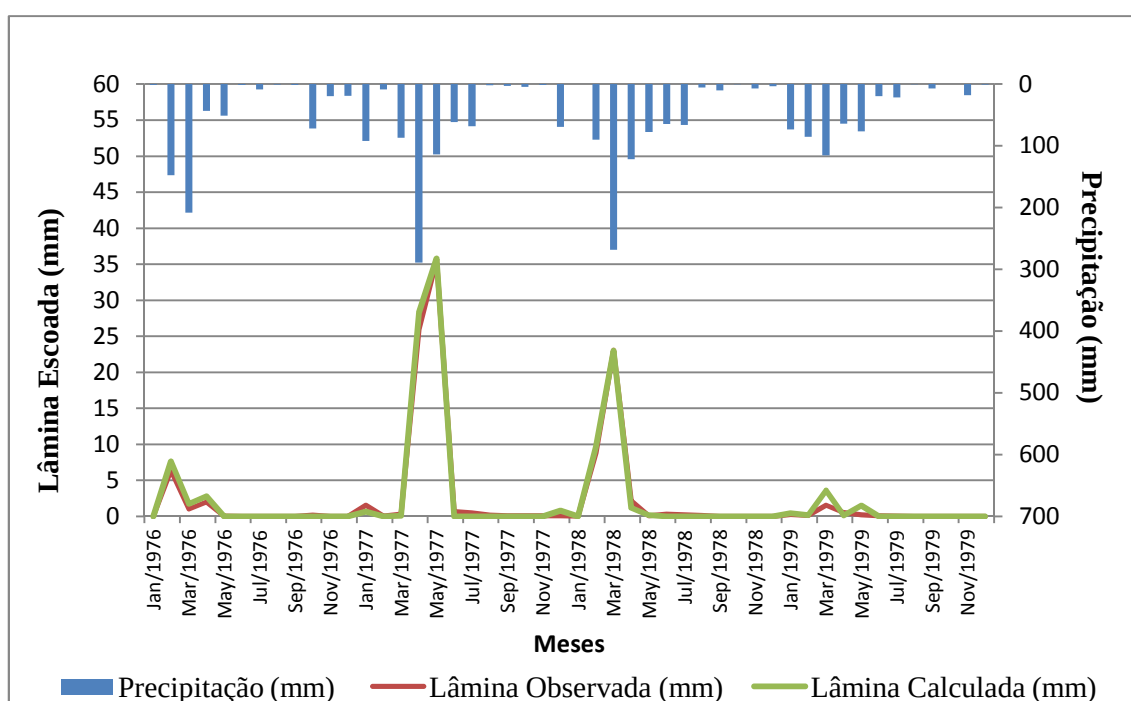


Figura 8 – Valores mensais de precipitação, lâmina escoada observada e simulada para a BRS no período de 1976 a 1979.

Distribuição espacial do escoamento superficial e a produção de sedimentos na BRS

As Figuras 8 e 9 mostram a distribuição espacial da geração do escoamento na bacia. Os maiores valores de escoamento foram produzidos na parte leste da bacia, com exceção do ano de 1979. Esta região corresponde à parte mais bem preservada da bacia e possui algumas áreas com declividade bastante acentuada. Os solos predominantes são os Luvisolo Crômico Órtico típico, Neossolo Litólico Eutrófico típico e associação destes; o primeiro possui permeabilidade moderada, já o segundo é caracterizado por uma permeabilidade média a lenta, proporcionando um escoamento superficial forte.

Observa-se também que a porção sudoeste da bacia também apresenta valores significativos de escoamento superficial, principalmente para os anos de 1977 e 1978, que correspondem aos anos mais chuvosos do período simulado. Apesar da predominância dos Solos Cambissolo Háplico, que possuem permeabilidade alta, esta região apresenta as maiores declividades de toda a bacia, sendo considerado seu relevo fortemente ondulado; além disso, esta é a região da bacia com maiores intervenções antrópicas. Esta combinação de fatores (declividade e uso do solo) se sobressai em relação ao tipo de solo, favorecendo o escoamento superficial.

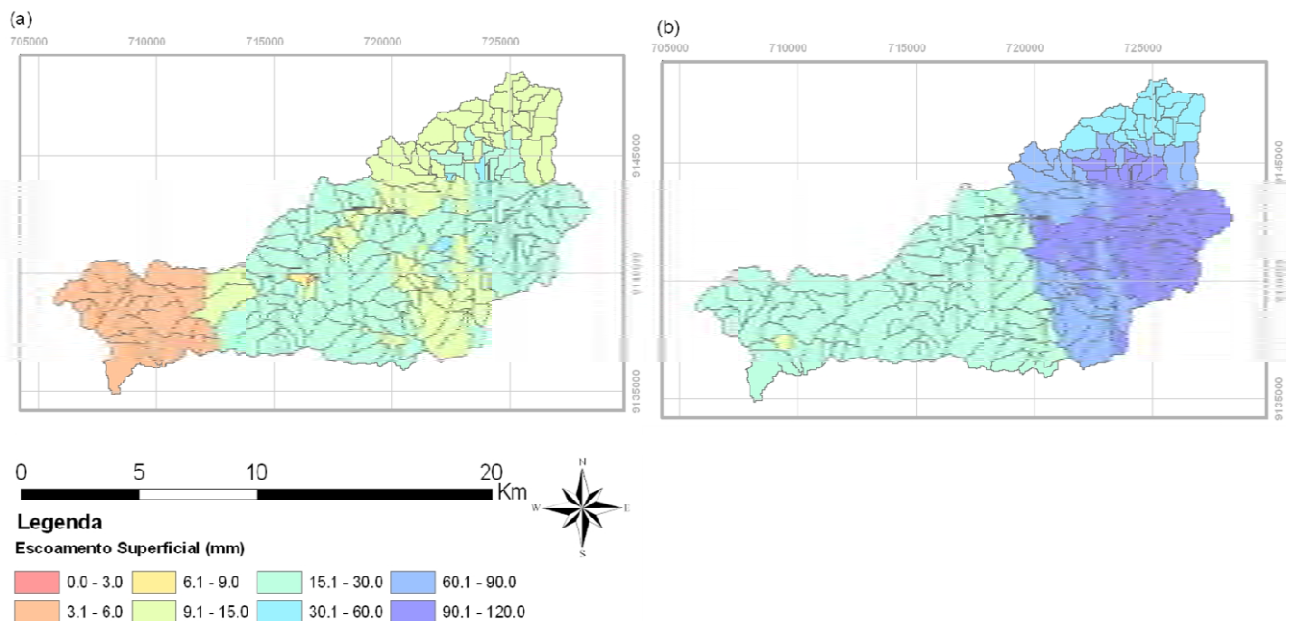


Figura 8 - Escoamento superficial médio anual para os anos de (a) 1976 e (b) 1977

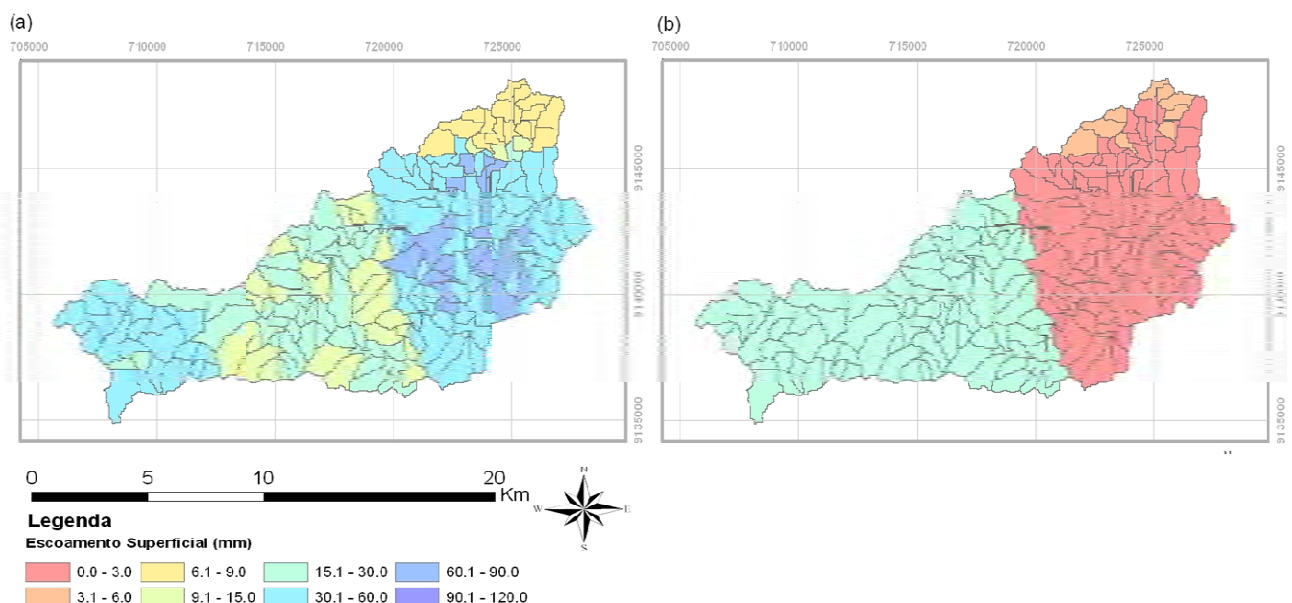


Figura 9 - Escoamento superficial médio anual para os anos de (a) 1978 e (b) 1979

As Figuras 10 e 11 mostram a distribuição espacial da produção de sedimentos simulada pelo modelo. Analisando as HRUs que compõem cada sub-bacia, verifica-se uma forte influência do uso do solo no processo de erosão. Conforme esperado, as sub-bacias com maiores intervenções antrópicas apresentam altas taxas de produção de sedimentos. Desta forma, têm-se produção de sedimentos elevadas nas sub-bacias com cultivo de milho, seguida das sub-bacias com cultivo de feijão; já as preservadas, ou seja, com vegetação nativa predominante, são as menos susceptíveis aos processos erosivos.

As regiões próximas ao exutório na porção nordeste da bacia, bem como as localizadas na parte sudoeste, apresentaram os maiores valores de produção de sedimentos. Ambas possuem declividades acentuadas e extensa área agrícola, sendo que a primeira corresponde a uma região de solo Luvisolo Hipocrômico Órtico, com alto fator de erodibilidade, e a segunda de solo Cambissolo Háplico Tb Eutrófico típico. De maneira geral, verifica-se uma relação direta entre o escoamento superficial e a produção de sedimentos no período observado.

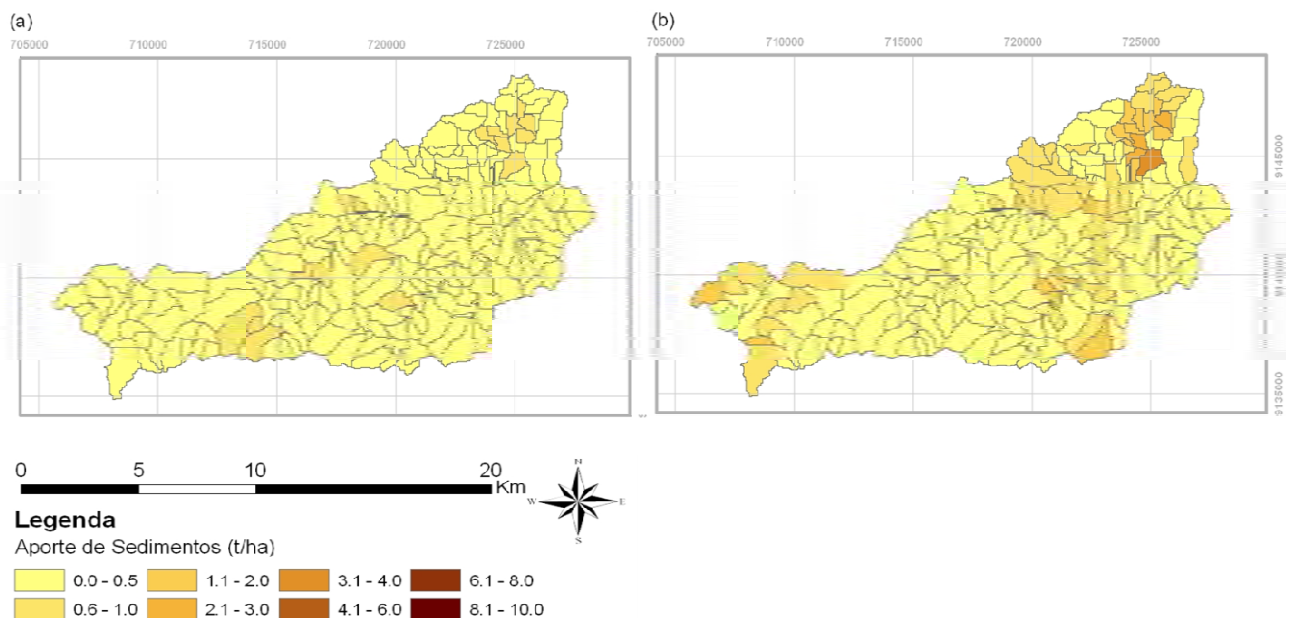


Figura 10 - Produção de sedimentos média anual para os anos de (a) 1976 e (b) 1977

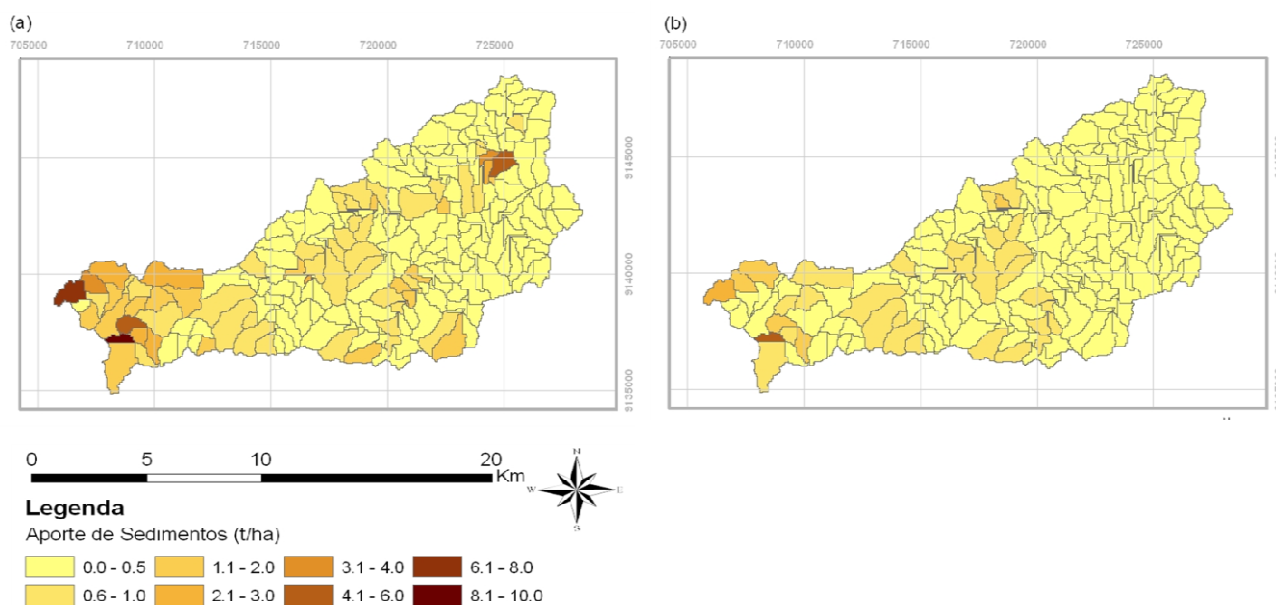


Figura 11 - Produção de sedimentos média anual para os anos de (a) 1978 e (b) 1979

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos para o escoamento superficial com o modelo parametrizado foram bastante satisfatórios pelos critérios do coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE), tanto para os escoamentos médios mensais quanto para os eventos individuais. Algumas discrepâncias encontradas entre os valores observados e simulados podem estar relacionadas com a utilização do Método da Curva Número para estimar o escoamento superficial, o qual não leva em consideração a intensidade e a duração da chuva, mas apenas o volume diário precipitado. Entretanto, este fato não impediu que o modelo obtivesse bons resultados nas simulações do escoamento superficial. Com relação à produção de sedimentos, esta acompanhou consistentemente as simulações do escoamento superficial.

Desta forma, pode-se concluir que houve um bom desempenho do modelo SWAT na simulação do escoamento superficial com o conjunto de parâmetros utilizados neste trabalho para a Bacia Representativa de Sumé e a utilização direta do banco de dados de culturas da interface ArcSWAT.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, FINEP e CAPES, pelo apoio financeiro e concessão de bolsas para o desenvolvimento desta pesquisa.

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, D. F. F.; LOPES, R. L.; RUFINO, I. A. A. (2011). “*Classificação automática do uso do solo como instrumento de apoio à gestão das águas subterrâneas na bacia sedimentar costeira da Paraíba*” in Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), Curitiba, São José dos Campos. INPE, pp. 3979-3986.
- 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, v. 34, n.1, pp.73 - 89.
- 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 (Mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, PP. 144.
- CADIER, E.; FREITAS, B,J, (1982). “*Bacia Representativa de Sumé: Primeira Estimativa dos Recursos de Água*”. SUDENE, Recife.
- CARVALHO NETO, J. G. (2011). “*Simulação hidrossedimentológica da bacia do Riacho dos Namorados com o modelo SWAT*”. Dissertação (Mestrado) PPGECA/CCT/UFCG, Campina Grande.
- CIBIN, R.; SUDHEER, K. P.; CHAUBEY, I. (2010). “*Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model*”. Hydrological Process, vol 24, pp 1133- 1148.
- LOPES, N. H. Y. (2008). “*Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais utilizando o modelo SWAT*”. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.
- LOPES, W. T. A. (2003). “*Efeitos de escala na modelagem hidrossedimentológica na região semiárida da Paraíba*”. Dissertação (Mestrado), PPGECA/CCT/UFCG, Campina Grande.
- FIGUEIREDO, E. E. (1998). “*Scale Effects and Land Use Change Impacts in Sediment Yield Modelling in a Semi-arid Region of Brazil*”. Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, University of Newcastle upon Tyne, Newcastle, UK.
- GOTTSCHALK, L.; BATCHVAROVA, E.; GRYNING, S. E.; LINDROTH, A.; MELAS, D.; MOTOVILOV, Y. U. G.; FREEH, M.; HEIKINHEIMO, M.; SAMUELSSON, P.; GRELLE, A.; PERSSON, T. (1999). “*Scale aggregation: Comparison of flux estimates from NOPEX*”. Journal of Agricultural and Forest Meteorology, v.98-99, p.103-120.
- GUERRA, A. J. T.; MENDONÇA, J. K. S. (2004). “*Erosão dos Solos e a Questão Ambiental*” in *Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil. Org. por GUERRA, A. J. T. e VITTE, C. A. ed.* Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, pp. 225-251.
- MACHADO, R.E. (2002). “*Simulação de Escoamento e de Produção de Sedimentos em uma Microbacia Hidrográfica utilizando Técnicas de Modelagem e Geoprocessamento*”. Tese (Doutorado em Agronomia), Escola Superior Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.
- MACHADO, R. E. ; VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. (2003). “*Simulação de Escoamento em uma Microbacia Hidrográfica utilizando Técnicas de Modelagem e Geoprocessamento*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 8, n. 1, pp. 147-155.

- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA (1972). *Levantamento Exploratório – Reconhecimento de solos do Estado da Paraíba*. Convênio de mapeamento de solos MA/ EPE-SUDNE. Rio de Janeiro.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. (2011). “*Soil and Water Assessment Tool. Theoretical documentation version 2009*”. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. (2005). “*Soil and Water Assessment Tool. Theoretical documentation version 2005*”. Temple, Blackland Research Center, Soil and Water Research Laboratory, 494p.
- PORTO, R.M. (1998). *Hidráulica Básica*. EESC/USP São Carlos- SP, 540 p.
- TAVEIRA, I.M.L.M. (2012). “*Avaliação de alternativas de uso do solo através da simulação hidrossedimentológica da Bacia Representativa de Sumé com o modelo SWAT*”. Dissertação (Mestrado), PPGECA/CCT/UFCG, Campina Grande.
- TUCCI, C. E. M. (2005) *Modelos Hidrológicos*. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 2ª Edição. Porto Alegre, 675 p.
- SALEH, A.; DU, B. (2004). “*Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS program for the Upper North Bosque River watershed in central Texas*”. Transactions of the ASAE, St.Joseph, v. 47, n. 4, pp. 1039-1049.
- SHARPLEY, A.N.; WILLIAMS, J.R.(1998). *EPIC – Erosion Productivity Impact Calculator, 1, Model documentation*. Washington: U,S, Departament of Agriculture, Agricultural Research Service, 1990. 145p.
- SRINIVASAN, R., ARNOLD, J.G. (1994) “*Integration of a basin-scale water quality model with GIS*”. Water Resources Bulletin, v.30,n.3, pp.453-462.
- SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, C. A. G.; GALVÃO, C. O. (2003). *Erosão Hídrica do Solo no Semi-Árido Brasileiro: A Experiência na Bacia Experimental de Sumé*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 8, nº 2, 56-72p.
- UZEIKA, T. (2009). “*Aplicabilidade do Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em pequena bacia hidrográfica rural*”. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 144p.
- VALERIANO, M. (2004). *Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul*. Instituto nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- WILLIAMS, J, R, (1995). *The EPIC model*. V.P. Singh (ed). Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications. pp. 909-1000.