

SIMULAÇÃO VAZÃO–EROSÃO USANDO O MODELO SWAT PARA UMA GRANDE BACIA DA REGIÃO SEMIÁRIDA DA PARAÍBA

José Carlos DANTAS¹, Marcela Alves da SILVA², Richarde Marques da SILVA³, Pedro Costa Guedes VIANNA⁴

- (1) Departamento de Geociências, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária. CEP 58051-900. João Pessoa, PB. Endereço eletrônico: j_c_dantas@hotmail.com
(2) Programa de Pós-Graduação em Geografia, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária. CEP 58051-900. João Pessoa, PB. Endereço eletrônico: marcelaalves2006@hotmail.com
(3) Departamento de Geociências, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária. CEP 58051-900. João Pessoa, PB. Endereço eletrônico: richarde@geociencias.ufpb.br
(4) Departamento de Geociências, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária. CEP 58051-900. João Pessoa, PB. Endereço eletrônico: pedrovianna18@hotmail.com

Introdução

Caracterização da área de estudo

Materiais e métodos

O modelo SWAT

Dados de entrada do modelo SWAT

Análise estatística de desempenho do Modelo SWAT

Tendências espaço-temporais da precipitação

Resultados e discussões

Estimativa do escoamento superficial

Análise de sensibilidade do modelo

Estimativa da produção de sedimentos

Conclusões

Referências bibliográficas

RESUMO – Modelos matemáticos apresentam grande potencial para serem utilizados como instrumento de apoio ao planejamento de uso da terra, com o propósito de melhorar a qualidade do solo e da água. Este trabalho tem como objetivo estimar a produção de sedimentos na bacia do Rio Taperoá, localizada na região semiárida do Estado da Paraíba, utilizando o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). Neste trabalho foram utilizados dados de precipitação, temperatura e umidade para o período de 1970 a 1993, além de mapas dos tipos de solos, uso e ocupação do solo e modelo de elevação digital. Valores simulados pelo modelo SWAT foram comparados com dados de vazão medidos e de produção de sedimentos estimados. O modelo foi calibrado e validado usando dados mensais de vazão para o posto fluviométrico Poço de Pedras. Os resultados mostram um bom ajuste, com vazão média observada de 6,86 m³/s e vazão média simulada de 7,73 m³/s, enquanto a produção de sedimentos para todo o período de 2,5 t/ha/ano. **Palavras-chave:** SWAT, Rio Taperoá, vazão, erosão dos solos.

ABSTRACT – Mathematical models have great potential to support land use planning, with the goal of improving water and land quality. This paper aims analyzed the water and soil yield at the Taperoá River basin, located in the semiarid region of Paraíba State, based on runoff-erosion model named, Soil and Water Assessment Tool (SWAT). In order to development of the study, rainfall, temperature and humidity data from 1970 to 1993, soil types map, land cover map and digital elevation model with spatial resolution of 30 m were used. The model was calibrated and validated by comparing simulated mean monthly runoff with observed long-term mean monthly runoff for runoff gauge Poço das Pedras. The results showed the effectiveness of the model for the analysis of runoff process with average observed runoff = 6.86 m³/s and average simulated runoff = 7.73 m³/s, while the sediment yield was 2.5 t/ha/ano.

Keywords: SWAT, Taperoá River, runoff, soil erosion.

INTRODUÇÃO

A erosão dos solos é um dos principais problemas que ocasionam a degradação ambiental em todo planeta, principalmente nas regiões áridas e semiáridas. Os prejuízos decorrentes desse processo podem abranger tanto o meio ambiente quanto a sociedade, sobretudo, no que tange a diminuição da produtividade dos solos, a perda de nutrientes, surgimento de ravinas e voçorocas, assoreamento de corpos hídricos, entre outros problemas (Guerra et al., 2010; Filizola et al.,

2011).

Para analisar e quantificar a ação da erosão dos solos, diversos modelos matemáticos vêm sendo aplicados para representar os processos de chuva-vazão-erosão e demais fenômenos do ciclo hidrológico em diversas escalas: parcelas, microbacias (Medeiros e Silva, 2014) e em bacias hidrográficas médias e grandes (Silva et al., 2013; Silva e Medeiros, 2014). Existem vários modelos para a determinação da erosão hídrica, como por exemplo, o CREAMS

(Knisel, 1980), ANSWERS (Beasley et al., 1980), Kinos2 (Woolhiser et al., 1990), WEPP (Lane et al., 1992), EUROSEM (Morgan, 1994), LISEM (Roo et al., 1996), entre outros. Um dos mais utilizados é a Equação Universal de Perda de Solo ou USLE (Universal Soil Loss Equation) proposta por Wischmeier e Smith (1978), versão posteriormente revista (RUSLE) por Renard et al. (1997). A USLE foi criada para estimar a quantidade de sedimento removido do solo a partir da erosividade das chuvas, sendo bastante disseminada em todo o mundo pela sua facilidade de aplicação (Bertoni e Lombardi Neto, 2010).

Atualmente, com a evolução da tecnologia, é possível integrar diversas informações neste modelo (e.g. ocupação do solo determinada a partir de imagens de satélite), o que o torna ainda mais procurado para a previsão da perda do solo e na determinação de áreas suscetíveis à erosão hídrica. Os modelos matemáticos distribuídos têm obtido grande ascensão na análise da erosão dos solos, permitindo espacializar os resultados mediante o acoplamento com Sistemas de Informações Geográficas – SIG, como é o caso do modelo SWAT (Arnold e Allen, 1996). Uma das vantagens dos modelos distribuídos é a sua capacidade de aplicação em escala de bacia hidrográfica, o que contribui para o desenvolvimento de estudos regionais sobre causas e consequências da erosão dos solos em escala de bacia em ambiente semiárido, que sofrem com a alta variabilidade hidrográfica e também eventos extremos de precipitação (Silva et al., 2014). Assim, este trabalho tem

como objetivos simular os processos de vazão e estimar a produção de sedimentos na bacia do Rio Taperoá utilizando o modelo SWAT.

Caracterização da área de estudo

A bacia do Rio Taperoá está inserida no semiárido paraibano, na Mesorregião da Borborema, entre as coordenadas 36°0'0"W, 37°15'0"W e 6°45'0"S, 7°45'0"S (Figura 1), compreendendo uma área de 5.658 km² e um perímetro de 436 km. O Taperoá, principal rio da bacia, de regime intermitente, nasce na Serra do Teixeira e desemboca no Rio Paraíba, no açude Boqueirão. Essa é uma região semiárida quente, com médias pluviométricas baixas (< 400 mm/ano) e temperaturas médias mensais sempre superiores a 18 °C.

Nesta região, a maior concentração do total precipitado ocorre em um período aproximado de dois a quatro meses (janeiro a abril), correspondendo a 65% da pluviosidade anual. A bacia do Rio Taperoá está situada de acordo com a classificação climática de Mendonça e Danni-Oliveira (2005) como sendo uma região de clima tropical equatorial do tipo 2d, com ocorrência de 9 a 11 meses secos (com concentração de chuvas entre os meses de fevereiro e abril), temperaturas elevadas com média acima de 28°C.

A vegetação predominantemente na bacia é do tipo caatinga, em sua maior parte de porte baixo, que divide espaço com lavouras de palma forrageira, algodão e agave (estas duas últimas de caráter mais voltado ao comércio), assim como lavouras temporárias de milho e feijão, que representam uma pequena área da bacia (Souza et al., 2004).

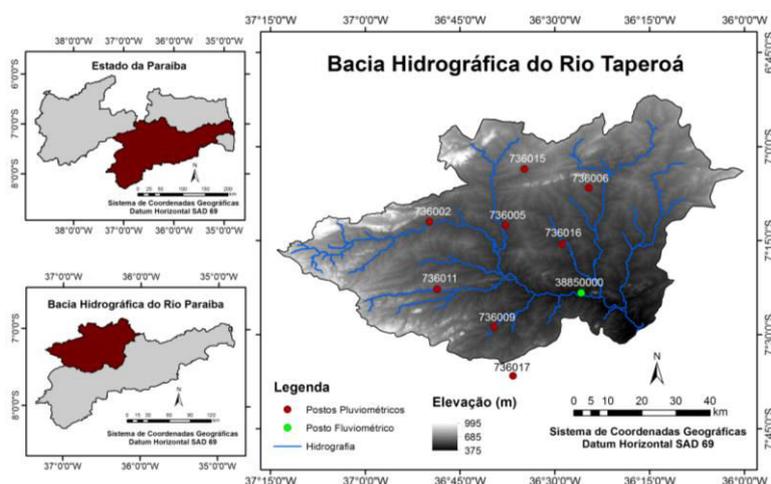


Figura 1. Localização geográfica da bacia do Rio Taperoá e dos postos pluviométricos e fluviométricos utilizados neste estudo.

MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo SWAT

O *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT (Arnold e Allen, 1996) é um modelo distribuído e de base física, desenvolvido para simular vazão e erosão e os impactos decorrentes das alterações no uso do solo em bacias hidrográficas. O SWAT simula o balanço hídrico na bacia a partir da equação.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad [1]$$

sendo SW_t a quantidade final de água no solo (mm); SW_0 a quantidade inicial de água no solo no dia i (mm); t o tempo (dias); R_i a precipitação no dia i (mm); Q_i o escoamento superficial no dia i (mm); ET_i a evapotranspiração no dia i (mm); P_i a percolação no dia i (mm); e QR_i o fluxo de retorno (ascensão capilar) no dia i (mm).

O modelo também calcula o escoamento superficial na bacia em decorrência do total de precipitação diária utilizando o método de curva número (CN) desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS), como:

$$Q_{surf} = \frac{(R_i - 0,2s)^2}{(R_i + 0,8s)} \quad [2]$$

sendo Q_{surf} o escoamento superficial diário (mm); e s o parâmetro de retenção de água no solo (mm), o qual varia de acordo com o uso do solo, tipo de solo e declividade, sendo obtido pela seguinte equação:

$$s = 25,4 \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \quad [3]$$

sendo CN o valor de curva número para o dia, que corresponde à capacidade de armazenamento de água para cada tipo de solo, podendo variar de 1 (alta permeabilidade) a 100 (solo impermeável).

Para a determinação da produção de sedimentos, o SWAT utiliza a equação universal de perda de solo modificada (MUSLE), a qual substitui o fator de erosividade da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) por um fator de escoamento superficial, permitindo a simulação da produção de sedimentos para um evento. A produção de sedimentos no SWAT é calculada por:

$$Y = 11,8 \left(Q_{sup} \cdot q_p \cdot area_{hru} \right)^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot CFRG \quad [4]$$

sendo Y a produção de sedimentos (t); Q_{sup} o volume escoado (m^3); q_p o pico do escoamento superficial (m^3/s^1); $area_{hru}$ a área da unidade de resposta hidrológica (ha); K_{USLE} o fator de erodibilidade do solo; C_{USLE} o fator de uso e manejo do solo; P_{USLE} o fator de práticas conservacionistas; LS_{USLE} o fator de topografia do terreno; e $CFRG$ o fator de fragmentação esparsa, que considera o afloramento de rocha na área.

Dados de entrada do modelo SWAT

Na bacia do Rio Taperoá são encontrados oito tipos predominantes de solos. A Figura 2a apresenta a espacialização dos tipos de solo e a Tabela 1 mostra os tipos de solos na bacia, bem como uma descrição sintética e a área de cada tipo de solo na bacia.

O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado a partir de uma imagem de

18/06/1990 do satélite Landsat-5 (sensor TM; órbita 215; ponto 065;), obtida junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Para a realização da classificação do uso do solo foi utilizado o método não supervisionado K-médias, com 1000 iterações. Foram determinadas 4 classes de uso do solo com base em visitas de campo à área de estudo. A Figura 2b apresenta a distribuição espacial do uso e ocupação do solo na bacia.

A bacia do Rio Taperoá apresenta uma grande diversidade de uso e ocupação do solo. Neste estudo foram identificados quatro tipos de uso do solo predominantes: vegetação herbácea (55,18%), vegetação arbustiva (35,50%), vegetação arbórea (8,82%) e corpos hídricos (0,50%). As áreas que correspondem à vegetação herbácea compreendem também plantios de diversas culturas, a exemplo da palma forrageira e do agave, e áreas com solo

exposto. A vegetação arbórea acompanha os corpos hídricos da região e também ocorre em áreas onde há impossibilidade do desenvolvimento de agricultura, como encostas declivosas e locais onde aflora o cristalino (Souza et. al., 2004).

A Figura 2c mostra as classes de declividade para cada sub-bacia da bacia do Rio Taperoá. As declividades foram obtidas a partir do

processamento do modelo de elevação digital da bacia a partir da imagem *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – Global Digital Elevation Model (ASTER-GDEM)*, com resolução de 30 metros (Chang et al., 2010), disponível no endereço <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp>.

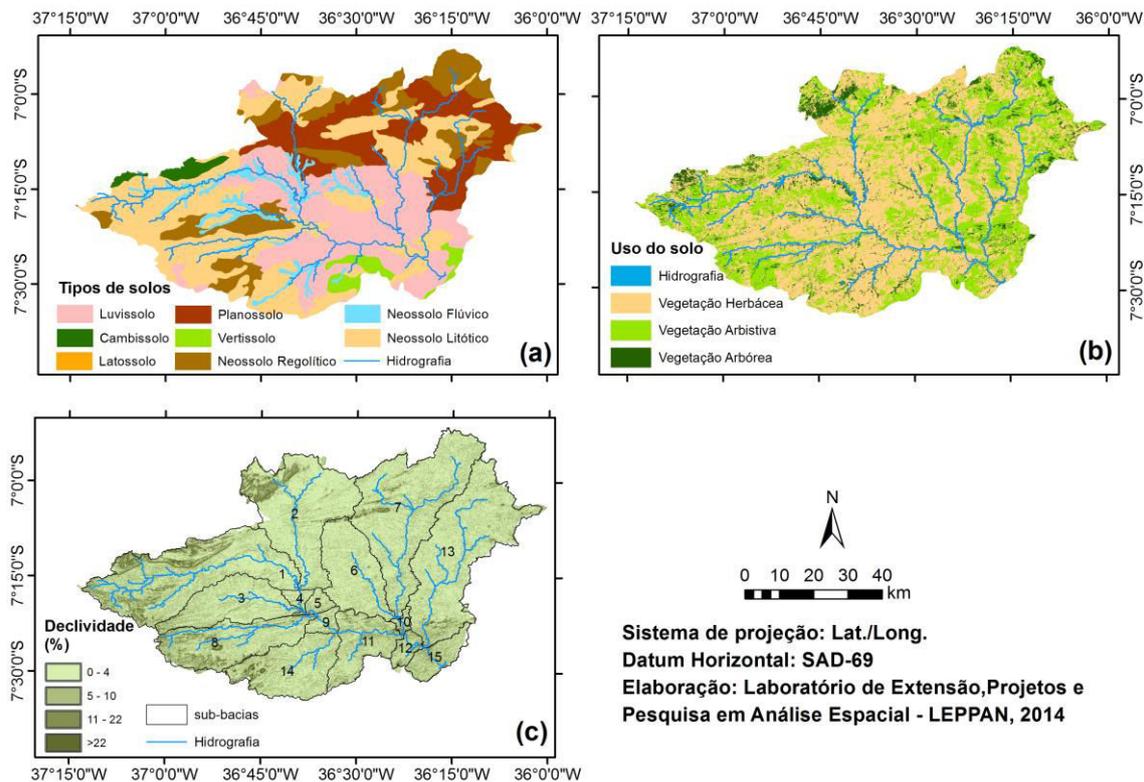


Figura 2. Mapas dos tipos de solos (a), uso do solo (b) e declividade (c) da bacia do Rio Taperoá.

Tabela 1. Tipos de solos para a bacia do Rio Taperoá com suas respectivas áreas e descrições.

Tipo de solo	Área (km ²)	Área (%)	Descrição
Neossolo Litólico	1994,76	35,5	solo constituído, em grande parte, por fragmentos de rocha maiores que 2 mm, apresentando contato direto entre o horizonte A e o C; pode ocorrer, em alguns casos, presença de horizonte B pouco desenvolvido
Luvisolo	1458,25	25,5	formado por material mineral, compreendendo horizonte B textural com alta saturação de bases e argilas de alta atividade
Planossolo	918,78	16,3	horizonte A ou E seguidos de horizonte B plânico (pouco permeável), constituído por material mineral
Neossolo Regolítico	793,42	14	horizonte A sobrejacente ao horizonte C, podendo haver horizonte Bi com espessura menor que 10 cm
Neossolo Flúvico	289,07	5	solo originário de sedimento aluvial de caráter flúvico
Vertissolo	131,61	2,3	horizonte vértico variando entre 25 e 100 cm de profundidade e com aspectos texturais insuficientes para caracterizar um horizonte B textural
Cambissolo	72,35	1,3	formado por material mineral com horizonte B incipiente abaixo da maioria dos horizontes superficiais
Latossolo	0,33	0,1	apresenta horizonte B latossólico imediatamente abaixo do horizonte A

Fonte: EMBRAPA (2006).

Para simular o escoamento superficial e a produção de sedimentos, o SWAT requer como dados de entrada mapas de uso e ocupação do solo, tipos de solos e o Modelo Digital de Elevação, além de dados climatológicos diários.

Neste estudo foram utilizados dados diários de oito postos pluviométricos e um fluviométrico, ambos controlados pela Agência Nacional de Águas (Tabela 2), para o período de 1970 a 1990.

Tabela 2. Localização e altitude dos postos pluviométricos e fluviométrico usados neste estudo.

Posto	Tipo	Código	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Coxixola	Pluviométrica	736017	-7,61	-36,61	465
Gurjão	Pluviométrica	736016	-7,26	-36,48	480
Juazeirinho	Pluviométrica	736015	-7,06	-36,58	570
Santa Tereza	Pluviométrica	736006	-7,11	-36,41	500
Santo André	Pluviométrica	736005	-7,21	-36,63	470
São José dos Cordeiros	Pluviométrica	736011	-7,38	-36,81	610
Serra Branca	Pluviométrica	736009	-7,48	-36,66	450
Taperoá	Pluviométrica	736002	-7,20	-36,83	500
Poço de Pedras	Fluviométrica	388500	-7,39	-36,43	430

Neste trabalho, o período de calibração dos dados de vazão compreendeu o período de janeiro de 1973 a dezembro de 1982. Vale ressaltar que foram utilizados três anos de aquecimento do modelo (1970 a 1972). A utilização do período que antecede a série de dados a serem verificados para o aquecimento do modelo é importante para o provimento e estabilidade das condições hidrológicas iniciais do modelo para a bacia antes de gerar os resultados. Esse método têm sido adotado em diversos estudos, como em Oliveira *et al.* (2006), Cibin *et al.* (2010), Lelis e Calijuri (2010), e Santos *et al.* (2014).

A calibração automática no modelo SWAT foi realizada mediante a utilização do *software* de domínio público SWAT-CUP, desenvolvido por Abbaspour *et al.* (2007). O SWAT-CUP possibilitou a realização da análise de sensibilidade, calibração e verificação dos parâmetros do modelo SWAT a partir do algoritmo *Sequential Uncertainty Fitting* – SUFI-2 (Abbaspour, 2004; 2007), sendo esse algoritmo o mais utilizado para a calibração automática do modelo SWAT em diversas bacias (Santos *et al.*, 2014; Fukunaga *et al.*, 2015; Abbaspour *et al.*, 2015). A Tabela 3 mostra os valores otimizados dos 19 parâmetros de entrada do modelo utilizados na etapa de calibração, após 500 interações na fase de calibração usando o *software* SWAT-CUP.

Adotou-se o valor de 500 interações por este ser o valor em que o SWAT-CUP já obtém um ajuste satisfatório para a série de dados utilizados, não necessitando aumentar ainda mais o número de interações. Os parâmetros são otimizados pelo SWAT-CUP de forma simultânea, sendo que a cada interação são atribuídos determinados valores aos parâmetros e o algoritmo relaciona os resultados simulados e observados de vazão em cada interação. Depois de finalizada a calibração para o número de interações estabelecidas, o SWAT-CUP informa a interação que apresentou o melhor ajuste, ou seja, os melhores valores para os parâmetros utilizados e os melhores valores estimados de vazão. Neste estudo, o algoritmo SUFI-2 encontrou o melhor ajuste na interação 429, sendo esta a que apresentou os melhores valores de cada parâmetro para a bacia estudada (Tabela 3) e, conseqüentemente, os melhores resultados para a vazão estimada. Após a fase de calibração foi realizada a validação do modelo utilizando dados de vazão para o período de janeiro de 1983 a dezembro de 1990.

Após o processo de calibração e validação do modelo foi realizada uma análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados na calibração. Esta análise procura identificar quais os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade na bacia durante o processo de validação.

Tabela 3. Valores otimizados dos parâmetros utilizados na calibração do modelo SWAT.

Parâmetro	Descrição	Valor
Alpha_Bf	Fator de recessão de escoamento de base	0,513
Biomix	Eficiência da mistura biológica do solo	0,571
Canmx	Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação	4,523
Cn2	Valor da curva número para a condição de solo úmido	-0,0482
Ch_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal	3,005
Ch_N2	Coefficiente de Manning do canal	0,2781
Epc0	Coefficiente de compensação da absorção de água pelas plantas	0,621
Esco	Coefficiente de compensação da evaporação de água no solo	0,6125
Gw_delay	Tempo de recarga do aquífero	-15,87
Gw_revap	Coefficiente de controle do fluxo da água entre as zonas saturada e não saturada	0,1163
Gw_qmn	Profundidade da água subterrânea necessária para ocorrer fluxo de retorno	665
Rchrg_Dp	Fração de água percolada para o aquífero profundo	-0,02533
Revapmn	Limite de água no solo para ocorrência da ascensão capilar na zona saturada	1,65
Slsbbsn	Comprimento da declividade média	0,1705
Sol_Alb	Albedo do solo	-0,0975
Sol_Awc	Capacidade de armazenamento de água no solo	0,2295
Sol_K	Condutividade hidráulica saturada do solo	-0,1665
Sol_Z	Profundidade da camada de solo	0,1015
Surlag	Tempo de retardo de escoamento superficial	7,992

Análise estatística de desempenho do modelo SWAT

Para a análise da comparação entre as vazões observadas e as simuladas foram utilizados dois métodos estatísticos: o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe – NS (Nash e Sutcliffe, 1970) e o Coeficiente de Determinação de Pearson (R^2).

O NS analisa o comportamento dos dados simulados em relação aos dados observados, podendo variar de $-\infty$ (infinito negativo) a 1, no qual $NS = 1$ indica um ajuste perfeito. Este coeficiente é calculado por:

$$NS = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E}_s)^2} \right) \quad [5]$$

sendo E_m o evento observado; E_s o evento simulado pelo modelo; \bar{E}_s a média do evento observado no período de simulação; e n o número de eventos.

O R^2 mede a associação linear entre duas variáveis, também variando de $-\infty$ (infinito negativo) a 1 (associação perfeita), sendo obtido pela equação:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)(x_i - x_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2 \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}} \right)^2 \quad [6]$$

sendo x_i os valores observados; x_m a média dos valores observados; y_i os valores calculados pelo modelo; y_m a média dos valores calculado pelo modelo; e n o número de eventos.

Tendências espaço-temporais da precipitação

Para se analisar a tendência da vazão foi utilizado o método não-paramétrico de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975). Esse teste tem sido amplamente aplicado para a detecção de tendências em séries pluviométricas e fluviométricas em várias partes do mundo (Duhan e Pandey 2013; Silva et al., 2015). A série de dados utilizada compreendeu todos os dados de precipitação dos postos utilizados nesta pesquisa. O método não-paramétrico de Mann-Kendall, inicialmente foi desenvolvido por Mann (1945) e reformulada por Kendall (1975), foi escolhido para testar a aleatoriedade contra tendência, porque esse procedimento tem a vantagem de não assumir qualquer forma especial para a

função de distribuição de dados, enquanto tendo um poder quase tão alto quanto seus concorrentes paramétricos; por estas razões, é altamente recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (Mourato et al., 2010). O teste de Mann-Kendall é calculado por:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad [7]$$

sendo n é o tamanho da série temporal, x_i e x_j

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^P t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad [9]$$

no qual P é o número de grupos amarradas, t_i é o número de valores analisados do grupo de P_{th} . Se os grupos não são vinculados, este processo pode ser ignorado. Um grupo vinculado é um conjunto de dados de amostra com o mesmo valor. Nos casos em que o tamanho da amostra $n > 30$, a estatística de teste normal padrão Z_S é calculado usando a Eq. (10):

$$Z_S = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad [10]$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estimativa do escoamento superficial

A Figura 3 apresenta a distribuição dos dados observados e simulados de escoamento superficial no período de calibração entre janeiro de 1973 e dezembro de 1982. Os resultados mostram que o modelo representou satisfatoriamente os principais picos de vazão no período estudado, com escoamento superficial médio observado de 6,86 m³/s e simulado de 7,73 m³/s. Mesmo essa bacia apresentando regime hidrológico de uma típica bacia do semiárido, ou seja, com escoamento somente após a ocorrência de eventos de chuva.

Nota-se que o modelo representou eficientemente os picos de escoamento entre 1973 e meados dos primeiros meses de 1978, enquanto no período seguinte mostrou-se menos eficiente na representação dos picos de vazão. Mesmo o SWAT tendo superestimado o escoamento superficial médio simulado nesse

os valores dos dados da série temporal i e j ($j > i$), respectivamente, e $\text{sgn}(x_j - x_i)$ é a função do sinal:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{se } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{se } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{se } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad [8]$$

A variação nesse método é calculada como:

A presença de tendência estatisticamente significativa na série temporal é avaliada através do valor de Z_S . Esta estatística é usada para testar a hipótese nula de que nenhuma tendência existe. Os valores positivos de Z_S indicam tendências crescentes, enquanto valores negativos Z_S mostram tendências decrescentes. A significância estatística foi realizada pelo teste p-valor. Quando $|Z_S| > Z_{1-\alpha/2}$, a hipótese nula é rejeitada e, portanto, uma tendência significativa é determinada na série histórica. $Z_{1-\alpha/2}$ é obtido a partir do quadro de distribuição normal padrão.

período, os índices de desempenho entre os dados observados e simulados ($NS = 0,84$ e $R^2 = 0,86$) são classificados segundo Moriasi et al. (2007) como “muito bom”.

Os resultados da validação do modelo (Figura 4) para o período entre janeiro de 1983 e dezembro de 1990 mostram valores que seguem a tendência da etapa de calibração, ou seja, o modelo novamente superestimou o valor médio observado, apresentando escoamento superficial médio observado de 3,40 m³/s e simulado de 6,87 m³/s. No que tange o desempenho do ajuste entre os valores de escoamento superficial observado e calculado, o valor de R^2 foi de 0,80; entretanto, o valor do NS não acompanhou a eficiência do ajuste obtido para o período de calibração, com $NS = 0,03$. Na Figura 4 percebe-se que o modelo não representou bem os picos de vazão no período analisado. No entanto, mesmo diante da

discrepância observada entre os dados observados para os dois períodos, o modelo apresentou um ajuste considerado razoável na

estimativa da vazão para o período de validação.

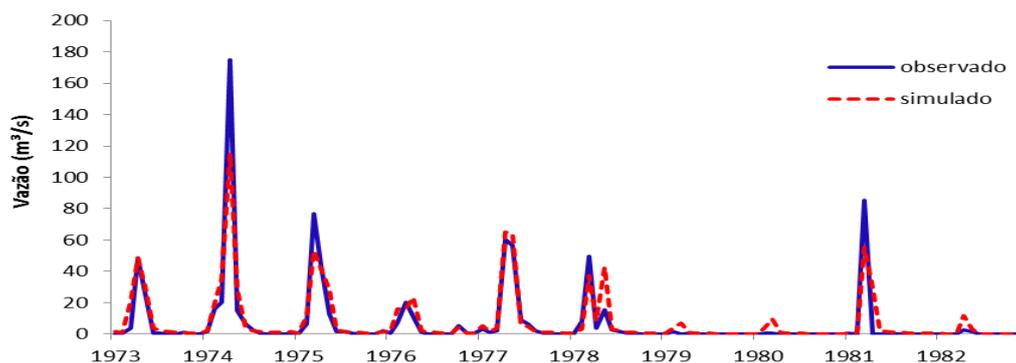


Figura 3. Comportamento dos dados de vazão observados e simulados no período de calibração (1973–1982), para a bacia do Rio Taperoá.

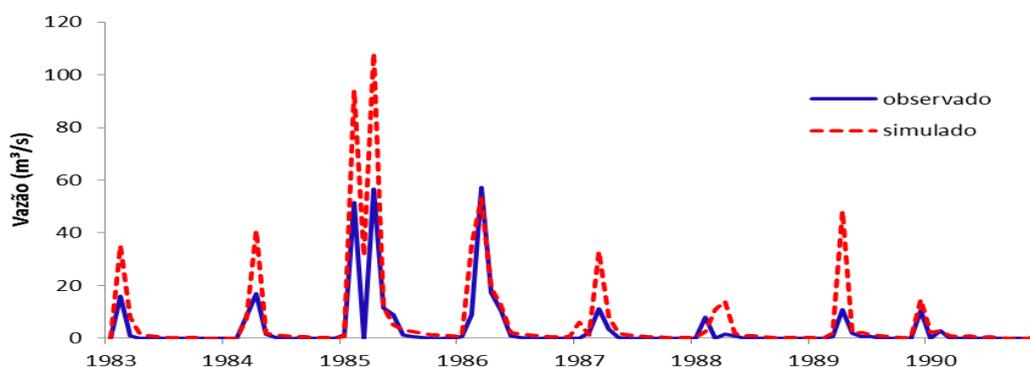


Figura 4. Comportamento dos dados de vazão observada e simulada no período de validação (1983–1990) para a bacia do Rio Taperoá.

Uma das razões para tal discrepância entre os resultados dos dois períodos pode estar relacionada à construção de diversos barramentos a partir de 1980 nessa bacia. Uma das consequências da construção de barramentos é a interceptação de parte do volume de água que deveria chegar ao posto fluviométrico, fazendo com que a série de vazões observadas do posto Poço de Pedras sofra alterações em relação ao período de calibração.

Pinheiro e Moraes (2010) ao estudarem a influência de barramentos de pequeno e médio porte na bacia hidrográfica do Rio Catú, no Estado do Ceará verificaram que a construção do reservatório Catú-Cizento alterou a contribuição do volume de água da bacia para o estuário do rio, pois antes da construção do reservatório o volume registrado na Lagoa do Catú (jusante) foi de $5 \times 10^7 \text{ m}^3$, e após a construção passou a ser de $4 \times 10^6 \text{ m}^3$.

A diminuição da vazão média no período de 1983 a 1990 em relação ao período de 1973 a 1982 na bacia do Rio Taperoá pode ser uma hipótese que houve alteração na quantidade do volume escoado na bacia, devido ao fato da construção de barramentos. A vazão média registrada no período de calibração foi de $6,86 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto que no período de validação, a vazão média foi de $3,40 \text{ m}^3/\text{s}$, ou seja, uma diminuição de aproximadamente 50% na vazão média entre 1983 e 1990 em comparação ao intervalo de 1973 a 1982. Assim, essa diminuição no escoamento superficial na bacia pode estar relacionada tanto a causas antrópicas, como fragmentação do uso e ocupação do solo e construção de reservatórios de pequeno e médio porte, tanto a alta variabilidade hidrográfica da bacia.

Outro fator que pode ter influenciado o regime hidrológico das vazões é a tendência e a variabilidade da precipitação no período

estudado. A Figura 5 mostra a tendência da precipitação média na bacia no período estudado. Essa figura mostra as estatísticas anuais das séries temporais e de tendência de precipitação total anual. Os resultados mostram uma mudança abrupta (diminuição da precipitação) dentro da série temporal, principalmente a partir do final da década de 1980, mais precisamente em 1986, com valor de Mann-Kendall igual a -2,41 (tendência negativa) e significância igual a 0,05, ou seja, tem 5% de erro ao dizer que não há tendência. No caso, a tendência negativa possui 95% de chance de estar certa.

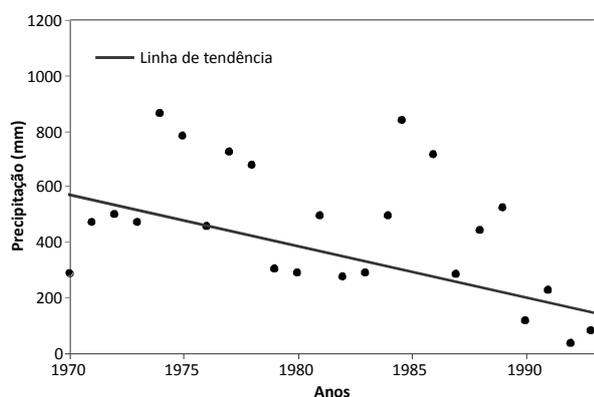


Figura 5. Análise de tendência da precipitação na bacia do Rio Taperoá entre 1970 e 1990.

Análise de sensibilidade do modelo

A Figura 6 mostra a sensibilidade dos parâmetros utilizados na calibração do modelo SWAT na bacia do Rio Taperoá. Os parâmetros mais sensíveis correspondem aqueles cujos valores mais se aproximam de 0, enquanto que os menos sensíveis são os que possuem valores mais distantes de 0.

Nota-se que os parâmetros mais sensíveis foram aqueles relacionados ao balanço hídrico e a condição de umidade no solo (CN2, GW_DELAY, GWQMN e GW_REVAP), seguidos dos parâmetros relacionados às próprias características do solo, como profundidade da camada, capacidade de armazenamento e presença de matéria orgânica no solo (SOL_AWC, SOL_Z, ALPHA_BF e BIOMIX). O desempenho desses parâmetros influencia diretamente no comportamento do escoamento superficial no terreno, pois estão correlacionados aos processos de água no solo, o que tende a provocar uma maior ou menor intensidade de escoamento durante a simulação.

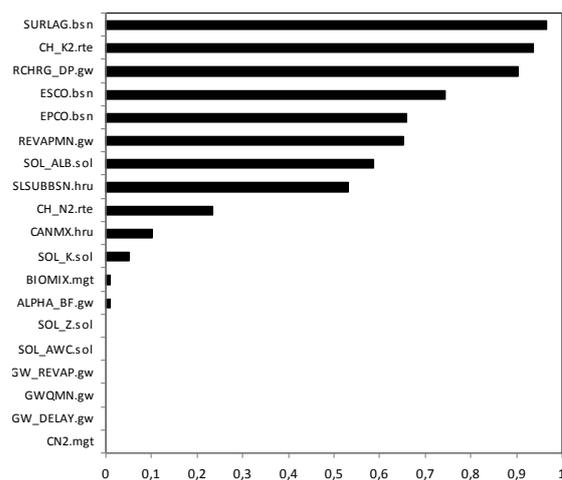


Figura 6. Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados na comparação entre os escoamentos observado e simulado.

Estimativa da produção de sedimentos

A estimativa da produção de sedimentos foi calculada para toda a série de dados, com exceção dos três primeiros anos de aquecimento do modelo. A Figura 7 mostra a relação entre os dados de chuva observada e a produção de sedimentos calculada. Nota-se que os eventos chuvosos que produziram sedimentos acima de 1 ton/ha/ano foram acima de 150 mm, e que grande parte dos eventos chuvosos produziram erosão menores do que 1 ton/ha/ano.

A Figura 8 apresenta o comportamento da relação entre os dados de vazão observada e de produção de sedimentos calculada. Com base nos resultados obtidos observam-se valores satisfatórios em se tratando da relação vazão–erosão ($R^2 = 0,61$). A relação entre a precipitação e a produção de sedimentos calculada apresentou resultado satisfatório, com $R^2 = 0,68$ (Figura 8). Nota-se que a correlação entre chuva observada e produção de sedimentos apresentou melhores resultados do que a correlação entre a vazão observada e a produção de sedimentos. Estes resultados também podem estar associados à construção de barramentos citados anteriormente, pois, a interceptação causada por barramentos influencia no volume de água que é represada ao longo do percurso do rio.

Em escala espacial, as porções oeste e nordeste da bacia, onde se localizam as sub-bacias 1, 3, 6, 7, 10 e 13, são as áreas que apresentam os menores valores de produção de sedimentos, com valores médios variando entre

1,7 e 2,1 t/ha/ano (Figura 9). Os resultados para esta área podem estar associados à influência da cobertura vegetal do tipo arbustiva e as baixas declividades que ocorrem nessas sub-bacias (com exceção da sub-bacia 1), que contribuem para amenizar a erosão. Silva et al. (2014) ao estudarem a relação entre perdas de solo e cobertura superficial em parcelas de 100 m² nas bacias experimentais de Sumé e São João do Cariri (ambas inseridas na bacia do Rio Taperoá) evidenciaram que uma parcela com solo revolvido gerou escoamento superficial aproximadamente cinco vezes maior que uma parcela com a presença da vegetação de caatinga nativa. Esse fato mostra a importância da preservação da vegetação do tipo caatinga no que tange a proteção do solo quanto aos processos erosivos.

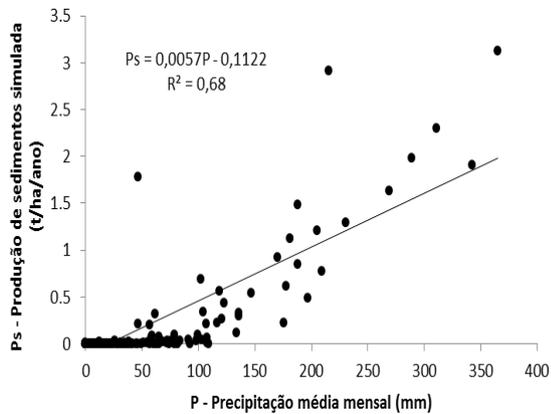


Figura 7. Relação entre os valores de chuva observada e produção de sedimentos estimados em cada sub-bacia no período entre 1973 e 1990 para a bacia do Rio Taperoá.

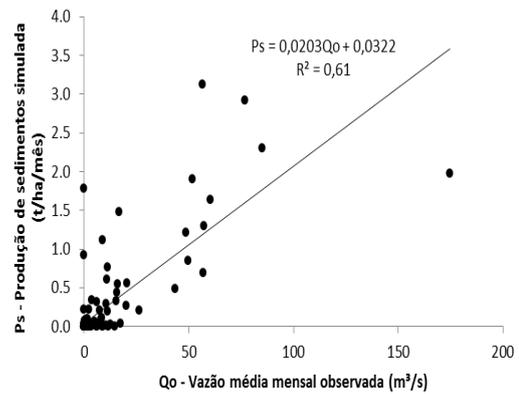


Figura 8. Relação entre os valores de vazão observada e produção de sedimentos estimada no período entre 1973 e 1990 para a bacia do Rio Taperoá.

A região sudoeste da bacia (sub-bacias 8 e 14) é a porção com as maiores taxas de produção de sedimentos. No caso da sub-bacia 14, a forte presença de vegetação herbácea e também a ocorrência de Neossolos Litólicos, solos que possuem baixos teores de matéria orgânica e ocorrem, geralmente, em áreas semiáridas de declives mais acentuados (Silva e Silva, 1997), fazem com que os processos de erosão nessa área sejam intensificados, visto que o terreno apresenta pouca cobertura vegetal e o solo possui baixa capacidade de infiltração. Nessa sub-bacia, a produção de sedimentos calculada foi de 4,7 t/ha/ano e na sub-bacia 8 foi de 3,4 t/ha/ano. Nesta última o resultado da produção de sedimentos pode estar associado à presença de altas declividades em determinadas áreas da sub-bacia e também à ocorrência de Neossolos Litólicos.

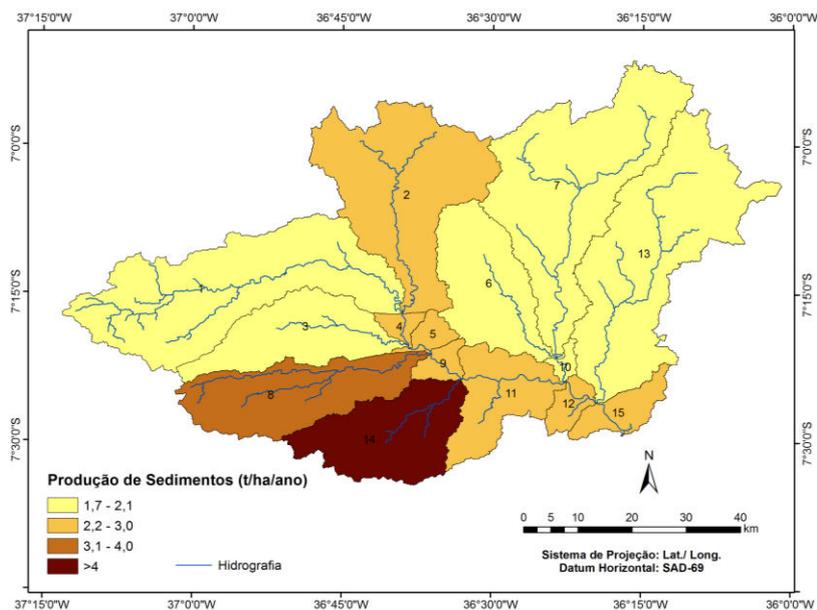


Figura 9. Produção de sedimentos na bacia do Rio Taperoá para o período de 1973 a 1990.

CONCLUSÕES

Diante do exposto constatou-se que o modelo SWAT apresentou um bom desempenho para a bacia do Rio Taperoá no período de calibração. Para o período de validação os resultados não acompanharam o ajuste encontrado no período de calibração, indicando certa incoerência dos dados observados, como exposto anteriormente.

No período de calibração o modelo estimou um escoamento superficial médio de 7,73 m³/s; enquanto que no período de validação apresentou um valor de 6,87 m³/s. Os resultados encontrados para ambos os períodos mostram que o SWAT superestimou o escoamento superficial médio observado, que foi 6,86 m³/s na calibração e 3,40 m³/s na validação.

Os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade foram o CN2, GW_DELAY, GWQMN e GW_REVAP (relacionados ao balanço hídrico e a condição de umidade no solo), seguidos do SOL_AWC, SOL_Z, ALPHA_BF e BIOMIX (associados às características intrínsecas do solo).

Os maiores valores da produção de sedimentos ocorrem na porção sudoeste da bacia, enquanto que as porções oeste e nordeste possuem as menores taxas de produção de sedimentos. O modelo estimou a produção de sedimentos em 2,5 t/ha/ano para o período de 1973 a 1990. Esta configuração deve-se, principalmente, ao uso do solo e os tipos de solos que compõem a bacia do Rio Taperoá.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABBASPOUR, K.C.; JOHNSON, A.; VAN GENUCHTEN, M.T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, v. 3, n. 4, p. 1340-1352, 2004.
2. ABBASPOUR, K.C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLØVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, v. 524, n. 5, p. 733-752, 2015.
3. ABBASPOUR, K.C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, v. 333, n. 3, p. 413-430, 2007.
4. ARNOLD, J.G. & ALLEN, P.M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *Journal of Hydrology*, v. 176, p. 57-77, 1996.
5. BEASLEY, D.; HUGGINS, L.; MONKE, E. ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v. 23, n. 4, p. 938-944, 1980.
6. BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7. ed. São Paulo, SP: Ícone, 2010, 355p.
7. CHANG, H.C.; LI, X.; GE, L. Assessment of SRTM, ACE2 and ASTER-GDEM using RTK-GPS. *Anais... 5th Australasian Remote Sensing & Photogrammetry Conference*, Alice Springs, Austrália, 13-17 de setembro, 2010.
8. CIBIN, R.; SUDHEER, K.P.; CHAUBEY, I. Sensitivity and identifiability of streamflow generation parameters of the SWAT model. *Hydrological Process*, v. 24, n. 9, p. 1133-1148, 2010.
9. DUHAN, D. & PANDEY, A. Statistical analysis of long term spatial and temporal trends of precipitation during 1901–2002 at Madhya Pradesh, India. *Atmospheric Research*, v. 122, p. 136-149, 2013.
10. EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006, 306p.
11. FILIZOLA, H.F.; ALMEIDA FILHO, G.S.; CANIL, K.; SOUZA, M.D.; GOMES, M.A.F. **Controle dos processos erosivos lineares (ravinas e voçorocas) em áreas de solos arenosos**. Circular Técnica, 22. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2011, 7p.
12. FUKUNAGA, D.C.; CECÍLIO, R.A.; ZANETTI, S.S.; OLIVEIRA, L.T.; CAIADO, M.A.C. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. *Catena*, v. 125, n. 2, p. 206-213, 2015.
13. GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. O início do processo erosivo. In: **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: Bertrand Brasil, 2010.
14. KENDALL, M.G. **Rank correlation methods**. Griffin, London, UK, 1975.
15. KNISEL, W. **CREAMS: A field-scale models for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems**. U.S. Department of Agriculture, Report 26, 1980.
16. LANE, L.; NEARING, M.; LAFLEN, J.; FOSTER, G.; NICHOLS, M. Description of the US Department of Agriculture Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model. In: Parsons, A.; Abrahams, A. **Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics**. UCL Press Ltd, London, UK, p. 377-391, 1992.
17. LELIS, T.A.; CALIJURI, M.L. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. *Revista Ambiente & Água*, v. 5, n. 2, p. 158-174, 2010.
18. MANN, H.B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, v. 13, p. 245-259, 1945.
19. MEDEIROS, I.C de & SILVA R.M. Análise da erosão hídrica na região semiárida da Paraíba usando o modelo SWAT acoplado a um SIG. *Geociências*, v. 33, n. 3, p.457-471, 2014.
20. MENDONÇA, F. & DANNI-OLIVEIRA, I.M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007, 206p.
21. MORGAN, R. The European Soil Erosion Model: an update on its structure and research base. In: RICKSON, R. **Conserving Soil Resources: European Perspectives**. CAB International, Cambridge, UK, p. 286-299, 1994.
22. MOURATO, S.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J. Interannual variability of precipitation distribution patterns in Southern Portugal. *International Journal of Climatology*, v. 30, n. 12, p. 1784-1794, 2010.

23. NASH, J.E. & SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n.1, p. 282-290, 1970.
24. OLIVERA, F.; VALENZUELA, M.; SRINIVASAN, R.; CHOI, J.; CHO, H., KOKA, S., AGRAWAL, A. ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS interface for SWAT. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 2, p. 295-309, 2006.
25. PINHEIRO, L.S. & MORAIS, J.O. Interferências de barramentos no regime hidrológico do estuário do rio Catú-Ceará-Nordeste do Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 22, n. 2, p. 237-250, 2010.
26. ROO, A.; WESSELING, C.; JETTEN, V.; RITSEMA, C. LISEM: a physically-based hydrological and soil erosion model incorporated in a GIS. **IAHS Publication**, v. 235, p. 395-403, 1996.
27. SANTOS, J.Y.G.; SILVA, R.M.; CARVALHO NETO, J.G.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SANTOS, C.A.G.; SILVA, A.M. Assessment of land-use change on streamflow using GIS, remote sensing and a physically-based model SWAT. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 364, p. 38-43, 2014.
28. SILVA, F.J. & SILVA, J.R.C. Produtividade de um solo litólico associada ao controle da erosão por cordões de pedra em contorno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 3, p. 435-440, 1997.
29. SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; SILVA, A.M. Predicting soil erosion and sediment yield in the Tapacurá catchment, Brazil. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 8, p. p. 75-82, 2014.
30. SILVA, R.M. & MEDEIROS, I.C. de. Análise hidrossedimentológica em ambiente SIG usando o modelo SWAT. **Geofocus**, v. 14, n. 2, p. 211-231, 2014.
31. SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J.; SILVA, V.C.L.; MEDEIROS, I.C. Rainfall and river flow trends using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in the Cobres River basin. **Natural Hazards**, v. 77, n. 2, p. 1205-1221, 2015.
32. SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; SILVA, V.C. L.; SILVA, L.P. Erosivity, surface runoff, and soil erosion estimation using GIS-coupled runoff-erosion model in the Mamuaba catchment, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 185, n. 11, p. 8977-8990, 2013.
33. SOUZA, B.I.; SILANS, A.M.P.B.; SANTOS, J.B. Contribuição ao estudo da desertificação na Bacia do Taperoá. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 2-3, p. 292-298, 2004.
34. WISCHMEIER, W.; SMITH, D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Department of Agriculture Handbook, 537, USDA, Washington, 1978.
35. WOOLHISER, D.A., SMITH, R.E.; GOODRICH, D.C. **KINEROS, a Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual**. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 1990, 130p.

*Manuscrito recebido em: 04 de Maio de 2015
Revisado e Aceito em: 23 de Junho de 2015*