

ANÁLISE HIDROSSEDIMENTOLÓGICA EM AMBIENTE SIG USANDO O MODELO SWAT

RICHARDE MARQUES DA SILVA^{1*}, ISABELLA DE CARVALHO MEDEIROS^{2**}

^{*}Departamento de Geociências, Universidade Federal da Paraíba

^{**}Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba
Cidade Universitária, CEP 58051-900 – João Pessoa, Paraíba, Brasil

¹richarde@geociencias.ufpb.br, ²bellamedeiros@hotmail.com

RESUMO

A utilização de modelos de predição chuva-vazão-erosão acoplados a Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são importantes ferramentas para a gestão dos recursos hídricos. Neste sentido, este trabalho analisou a variabilidade espacial e temporal do escoamento superficial e da produção de sedimentos usando o modelo hidrossedimentológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) em ambiente SIG. Este estudo foi realizado na Bacia Experimental de São João do Cariri, localizada na porção semiárida do Estado da Paraíba, Brasil. Para a realização deste trabalho foram utilizados dados climatológicos, chuva, escoamento superficial e produção de sedimentos diários para o período de 2004 a 2006, mapa de uso e ocupação do solo obtido a partir de imagens do satélite IKONOS, mapa digital de elevação com resolução espacial de 30 m e mapa dos tipos de solo da bacia. Os resultados obtidos demonstraram a eficácia do modelo para a análise da produção de sedimentos e vazão, obtendo-se valores de Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (R^2) de 0,84 e 0,88 e Coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE) de -0,32 e 0,77 para produção de sedimentos e escoamento superficial, respectivamente. Conclui-se que o modelo SWAT acoplado ao SIG é uma ferramenta poderosa na análise do comportamento temporal e espacial dos processos hidrossedimentológicos.

Palavras chave: SIG, modelo hidrossedimentológico, erosão.

RUNOFF-EROSION ANALYSIS IN GIS ENVIRONMENT USING THE SWAT MODEL

ABSTRACT

The use of models to predict rainfall-runoff-erosion coupled to Geographic Information System (GIS) are important tools for the management of water resources. This study analyzed the spatial and temporal variability of runoff and sediment yield using runoff-erosion model, *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) in GIS environment. This study was conducted at the São João do Cariri Experimental Basin, which is located within semiarid portion of Paraíba State, Brazil. In

order to development of the study, climatological and runoff data from 2004 to 2006, digital elevation model and land use and soil maps were used. Land cover map from IKONOS satellite images, digital elevation model map with 30 m of spatial resolution map, and soil types map also were used. The results showed the effectiveness of the model for the analysis of sediment yield and streamflow with Pearson Linear Coefficient (R^2) of 0.84 and 0.87 and Nash-Sutcliffe Coefficient (COE) of -0.32 and 0.75 for sediment yield and streamflow, respectively. It is concluded that the SWAT model coupled with GIS is a powerful tool in the analysis of temporal and spatial behavior of runoff-erosion processes.

Keywords: GIS, runoff-erosion model, erosion.

1. Introdução

O estudo da erosão dos solos é muito importante sob os aspectos sociais e econômicos, uma vez que analisa as perdas de solo em terras agricultáveis e em outras áreas de interesse imediato, bem como pelos efeitos indiretos, como no assoreamento dos rios e lagos (Silva *et al.*, 2012). Com a aplicação de modelos hidrossedimentológicos que utilizam como dados de entrada imagens de alta e moderada resoluções espaciais é possível detectar mudanças no uso do solo e analisar a variabilidade espacial e temporal dos impactos causados pela ação antrópica no escoamento superficial e na produção de sedimentos (Braga *et al.*, 2013), sobretudo na região semiárida do Nordeste, que se caracteriza por alta variabilidade de chuva, escassez hídrica, vegetação do tipo caatinga e pequena espessura da camada de solo (Paiva *et al.*, 2012; Ezz-aldeen e Al-Ansari, 2013).

A utilização de modelos matemáticos está em ascensão e vem mostrando, cada vez mais, a importância destes estudos. O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) tem uma interface razoavelmente amigável e o fato deste interagir com um Sistema de Informações Geográficas (SIG) enriquece a análise das pesquisas, uma vez que o SIG permite a visualização de diversas informações topográficas, morfométricas, entre outras, sobretudo a geração de mapas. Nesta perspectiva, o uso de geotecnologias é de fundamental importância para os estudos ambientais, pois permitem atualizar e integrar diferentes bases espaciais, para serem utilizadas em estudos de modelagem ambiental, isto é, são importantes meios para se conhecer o comportamento hidrológico e do uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas (Silva *et al.*, 2013b).

Mais recentemente, com a evolução dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) tornou-se possível sua integração com modelos hidrossedimentológicos distribuídos, como é o caso do modelo SWAT. Os modelos hidrossedimentológicos são ferramentas que vêm sendo utilizadas para estudar o comportamento hidrossedimentológico e/ou prever os impactos das mudanças na paisagem e sua influência no escoamento superficial e a produção de sedimentos (Silva *et al.*, 2013a). Mais especificamente, esse modelo oferece ferramentas para prever o efeito das ações de uso e manejo do solo sobre os recursos hídricos, produção de sedimentos, produção de nutrientes e pesticidas, entre outros. A eficácia do SWAT na representação da distribuição espacial do uso e ocupação do solo, tipos de solo, declividade e sua diversidade de parâmetros responsáveis pelo controle dos processos do ciclo hidrológico, torna o modelo um dos mais utilizados no mundo (Silva *et al.*, 2013a).

A integração entre técnicas de SIG e modelos hidrossedimentológicos é uma importante ferramenta para o gerenciamento da água e do solo, principalmente em ambientes de clima semiárido, como é o caso de grande parte do Estado da Paraíba. Nessa perspectiva, este estudo tem como objetivo testar a variabilidade espacial e temporal do escoamento superficial e da produção de sedimentos usando o modelo hidrossedimentológico SWAT em ambiente SIG, utilizando dados de uso do solo com alta resolução espacial (1 m) e de altitude (30 m), para analisar o comportamento da produção de sedimentos e escoamento superficial na bacia experimental de São João do Cariri, localizada na porção semiárida do Estado da Paraíba.

2. O modelo SWAT

O SWAT é um modelo matemático desenvolvido nos EUA pelo *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University* (Souza *et al.*, 2009). Esse modelo tem como objetivo simular o efeito das ações de uso e manejo do solo sobre os recursos hídricos, produção de sedimentos, produção de nutrientes e pesticidas, entre outros, requerendo como dados de entrada informações sobre chuva, temperatura, umidade, solos, relevo e mapas de uso do solo (Silva *et al.*, 2011).

Os dados tabulares são compostos por dados climatológicos (precipitação, umidade relativa e temperatura), que são utilizados para calcular a climatologia da bacia e iniciar os processos de transformação chuva-vazão-erosão. As bases espaciais são constituídas pelo Modelo Digital de Elevação (MDE), mapa de uso e ocupação do solo, e mapa dos tipos de solos, que são utilizados para gerar as sub-bacias e os fluxos de drenagem. O MDE possui resolução espacial de 30 m e foi adquirido diretamente no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Valeriano, 2005; Valeriano *et al.*, 2009), através do seguinte endereço: <http://www.dsr.inpe.br/topodata>. A figura 1 mostra os processos hidrológicos representados no modelo SWAT.

Para a estimativa da infiltração, do escoamento superficial e da força de desprendimento pelo fluxo da água é necessária a determinação do balanço hídrico. Para tanto, o modelo SWAT utiliza a seguinte equação:

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

sendo SW_t o conteúdo final de água no solo (mm), SW o conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como conteúdo de água inicial menos o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (mm), t o tempo (dias), R_i a precipitação (mm), Q_i o escoamento superficial (mm), ET_i a evapotranspiração (mm), P_i a percolação (mm), e QR_i o fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

Silva, R.M. e Medeiros, I.C. (2014): “Análise hidrossedimentológica em ambiente SIG usando o modelo SWAT”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 14 , p. 211-231. ISSN: 1578-5157



Figura 1. Fluxograma do modelo SWAT em ambiente SIG.

Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2013b).

A evapotranspiração é determinada pela soma da evaporação do solo e a transpiração das plantas, ambas determinadas em função da evaporação potencial. O modelo oferece três opções para a estimativa da evaporação potencial: Penman e Monteith, Hargreaves e Samani, e Priestley e Taylor. No modelo a componente percolação usa uma técnica de propagação do armazenamento, combinando com um modelo de fluxo em fendas para simular o escoamento através de cada camada de solo. Uma vez percolada abaixo da zona das raízes, este volume é armazenado como água subterrânea ou surge como escoamento de retorno a jusante do ponto considerado. Essa técnica é apresentada pela equação:

$$SW_i - SW_{oi} \exp\left(\frac{\Delta t}{TT_i}\right)$$

sendo SW_i e SW_{oi} a umidade do solo no começo e fim do dia (mm), respectivamente, Δt o intervalo de tempo (h), TT o tempo de propagação através da camada i em h, e i o índice de identificação da camada do solo.

Assim, a percolação pode ser calculada pela seguinte relação:

$$P_i = SW_{oi} \left[1 - \exp\left(\frac{\Delta t}{TT_i}\right) \right]$$

no qual P_i a percolação em mm/dia.

O tempo de propagação nas camadas de solo é calculado através da equação:

$$TT_i = \frac{(SW_i - FC_i)}{K_s}$$

sendo FC é a capacidade de campo, menos a lâmina de água do ponto de murchamento para a camada i (mm), e K_s é a condutividade hidráulica do solo (mm/h).

A água contida solo no ponto de murchamento, bem como a capacidade de campo são definidos pelo modelo como função da densidade do solo em cada sub-bacia. A erosão dos solos no modelo SWAT é simulada por intermédio da Equação Universal de Perda de Solo Modificada – MUSLE (Williams, 1975), a qual é uma versão modificada da Equação Universal de Perda de Solo – USLE (Wischmeier e Smith, 1965). Enquanto no modelo USLE são utilizados os índices de precipitação como medidas indicativas de energia do impacto das gotas de chuva no solo, a MUSLE usa a quantidade de escoamento superficial para simular a produção de sedimentos. O uso da MUSLE resulta em inúmeros benefícios, entre eles, ganho na precisão do modelo e a necessidade de uma razão de transporte é eliminada, permitindo que a equação seja aplicada para eventos de chuva individuais.

$$P_{sed} = 11,8(Q_{surf} \times Q_{peak} \times area_{hru})^{0,56} \times K_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times LS_{USLE}$$

no qual P_{sed} é a produção de sedimentos em um dado dia (ton), Q_{surf} o volume de escoamento superficial (mm), Q_{peak} o pico do escoamento superficial (m³/s), $area_{hru}$ a área das Unidades de Resposta Hidrológica – HRU (ha), K_{USLE} o fator de erodibilidade do solo (t·h·ha/MJ/mm), C_{USLE} o fator de manejo e cobertura do solo (adimensional), P_{USLE} o fator de práticas conservacionistas (adimensional), e LS_{USLE} o fator topográfico (adimensional).

3. Materiais, dados e métodos

3.1. Localização e caracterização da área de estudo

A Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC) possui uma área de aproximadamente 13,5 km² e está localizada entre as coordenadas 7° 20' 11" e 7° 23' 17" de latitude Sul, e 36° 31' 18" e 36° 33' 25" de longitude Oeste (figura 2). Esta bacia está inserida no bioma Caatinga, na zona fisiográfica do planalto da Borborema, mais precisamente na Mesorregião da Borborema, Estado da Paraíba, Brasil. Esta bacia possui clima do tipo BSh, caracterizado por insuficiência e irregularidade das precipitações pluviais e ocorrência de temperaturas elevadas. Segundo Paiva *et al.* (2012), a precipitação pluvial média anual é de aproximadamente 700 mm, a temperatura média anual é de 24°C e a umidade relativa média anual é de 57%.

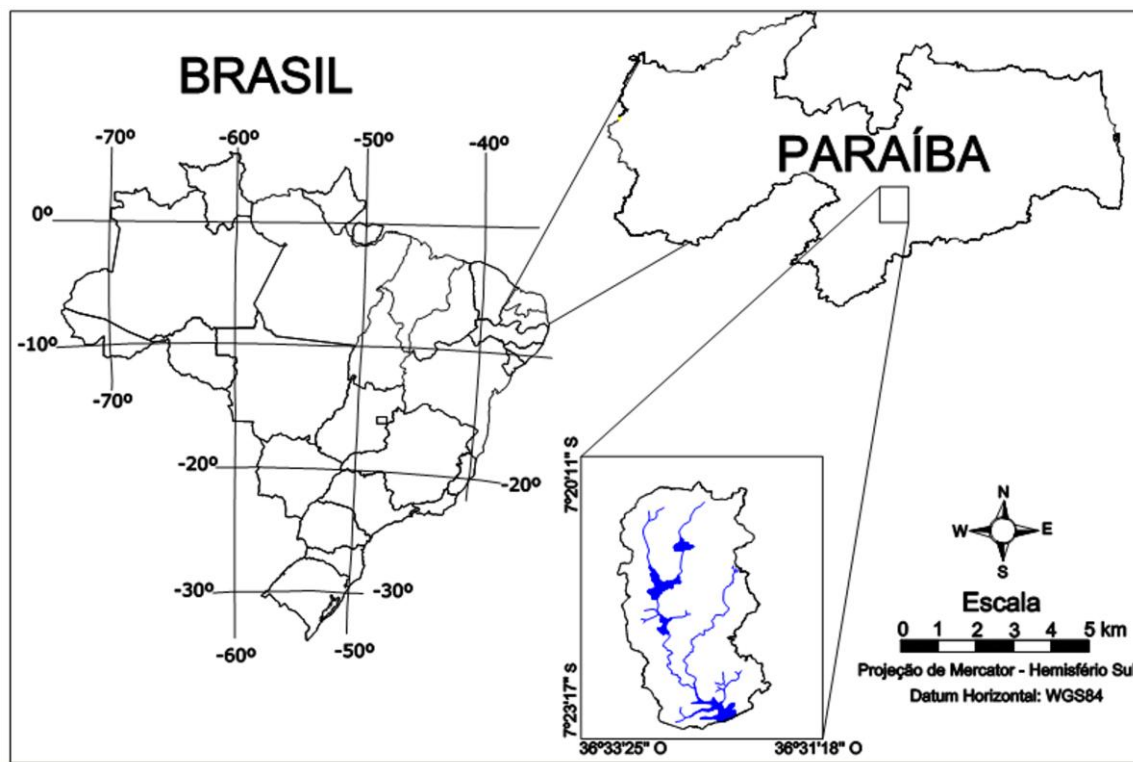


Figura 2. Localização geográfica da Bacia Experimental de São João do Cariri.

Fonte: Medeiros *et al.* (2013).

3.2. Mapeamento do uso e ocupação do solo

Para o levantamento cartográfico do uso e ocupação do solo da área de estudo utilizou-se uma imagem do satélite IKONOS, de maio de 2010, com resolução espacial de 1 m, adotando-se a seguinte composição colorida: Banda 1 (R), Banda 4 (G) e Banda 3 (B). O método de classificação utilizado foi o manual, por se tratar de uma imagem de alta resolução espacial a qual permitiu uma classificação mais precisa da cobertura do solo na bacia.

De acordo com a refletância espectral dos alvos foi possível classificar sete classes de uso e ocupação do solo: Vegetação Rasteira, Vegetação Arbustiva, Vegetação Arbustiva-arbórea, Área de Cultivo, Solo Exposto, Água e Área Construída. As classes de uso do solo foram checadas em campo com visitas à bacia, durante o período de novembro a dezembro de 2012, para uma melhor definição das amostras dos tipos de uso e ocupação do solo.

A área classificada como Vegetação Rasteira corresponde à vegetação que acompanha o curso dos rios, sejam eles intermitentes ou temporários, e também no entorno de açudes, em sua maior parte formada por vegetação herbácea. De acordo com Alcoforado-Filho *et al.* (2003), as áreas classificadas como Vegetação Arbustiva e Vegetação Arbustiva-Arbórea são representativas do bioma da caatinga, e se diferem pelo porte, sendo a arbustiva aquela vegetação com porte

arbóreo de até 1,5 m de altitude, a Arbustiva-Arbórea com porte entre 1,6 a 5,0 m de altitude (Xavier *et al.*, 2013). A classe Área de Cultivo corresponde às áreas de reflorestamento com espécies do tipo Algaroba (*Prosopis Juliflora*) e também constituída por pequenas áreas agrícolas. A classe Solo Exposto é caracterizada pela falta de cobertura vegetal. As classes Área Construída e Água representam áreas com edificações e rios e açudes, respectivamente.

3.3. Mapeamento dos tipos de solos

O mapa dos tipos de solos da bacia foi obtido junto ao levantamento exploratório e reconhecimento de solos do Estado da Paraíba (Ministério da Agricultura, 1972). Os tipos de solos encontrados na Bacia Experimental de São João do Cariri foram: Cambissolo Háplico, Neossolo Litólico, Luvisso Crômico e Vertissolo Cromado. Deve-se destacar também a presença de afloramentos rochosos, pois os solos na bacia se caracterizam por serem na sua grande maioria rasos e o subsolo derivado do embasamento cristalino.

Segundo Chaves (2002), os solos Luvisso Crômico encontrados na bacia são solos rasos a moderadamente profundos, com sequência de horizontes do tipo A, B e C com textura argilosa ou média, bem drenados, desenvolvidos de rochas metamórficas. Apresentam minerais primários de fácil intemperização no perfil e fertilidade natural média a alta.

Quanto aos solos Vertissolo Cromado, estes são solos argilosos a muito argilosos e menos desenvolvidos que os Luvisso, possuindo uma toposequência de horizonte A-C-R. Podem apresentar fendilhamento, quando secos, e boa fertilidade. São rasos a moderadamente profundos, podem ser pedregosos e normalmente ocorrem em relevo plano a suave ondulado (PAES-SILVA, 2002).

Os solos Neossolo Litótico se caracterizam por serem muito rasos a rasos, com sequência de horizonte do tipo A-R com textura arenosa ou média, moderadamente drenados, com horizonte A fraco ou moderado (PAES-SILVA, 2002). Os solos do tipo Cambissolo são pouco desenvolvidos, com horizonte B incipiente; pouco profundo e, muitas vezes, cascalhento. São solos considerados "jovens" que possuem minerais primários e altos teores de silte até mesmo nos horizontes superficiais. Por possuírem alto teor de silte e a pouca profundidade, estes solos apresentam permeabilidade muito baixa. O maior problema, no entanto, é o risco de erosão (EMBRAPA, 1999).

3.4. Definição dos parâmetros das classes de cobertura do solo e tipos de solo do modelo SWAT

O modelo SWAT possui um banco de dados com diversos parâmetros para cada tipo de uso e ocupação do solo. Neste estudo foram realizadas associações/adaptações entre os tipos de uso do solo do SWAT e os usos existentes na bacia. A classe Arbustivo-arbórea foi reclassificada como Range Brush, a classe Arbustiva foi associada a Range Grass, e a Área de Cultivo, por ser predominantemente formada por replantio de Algaroba, pôde ser reclassificada como Honey Mesquite, que é uma planta da mesma família da Algaroba. A classe Vegetação Rasteira foi vinculada a Wetlands-Non-Forested, que se trata de uma vegetação de pequeno porte que permanece úmida na maior parte do ano. A classe Água foi classificada como Water e a classe Área

Construída foi associada à Residencial. A Tabela 1 mostra o resumo dos dados alterados que foram inseridos no banco de dados do uso e ocupação do solo do modelo SWAT.

Tabela 1. Valores dos parâmetros dos tipos de solo no Modelo SWAT

Parâmetros	Tipos de Solos		
	Luvisolo Crômico	Vertissolo Cromado	Neossolo Litólico
Número de camadas	3	4	2
CLAY (1)	14	28	8
SILT (1)	33	19	20
SAND (1)	53	53	72
SOL_CBN (1)	1,36	1,53	0,56
SOL_Z (1)	40	40	200
USLE_K (1)	0,15061	0,1228	0,16511
SOL_AWC (1)	0,175	0,15	0,175
SOL_CBN (2)	0,63	0,65	0,31
SOL_Z (2)	180	250	350
USLE_K (2)	0,16345	0,13013	0,17058
SOL_AWC (2)	0,15	0,142	0,175
CLAY (3)	40	39	—
SILT (3)	23	17	—
SAND (3)	37	44	—
SOL_CBN (3)	0,35	0,51	—
SOL_Z (3)	500	650	—
USLE_K (3)	0,1475	0,138	—
SOL_AWC (3)	0,175	0,183	—
SOL_CBN (4)	—	0,32	—
SOL_Z (4)	—	900	—
USLE_K (4)	—	0,1438	—
SOL_AWC (4)	—	0,15	—

No que tange os parâmetros mais sensíveis que foram ajustados para cada tipo de uso do solo destacam-se o de área foliar (BLAI) e a altura da copa (CHTMX) que, segundo Carvalho Neto (2011), são parâmetros bastante influentes no escoamento superficial e no aporte de sedimentos foram modificados no banco de dados do modelo e utilizados nas simulações. Os parâmetros de porosidade e condutividade hidráulica do solo foram definidos baseados em Rawls e Saxton (1982), como sendo 0,398 e 4 mm/h, respectivamente, valores estes que foram adotados para todos os tipos de solo. Para o valor da profundidade da raiz utilizou-se o valor da profundidade da última camada de cada solo e à densidade aparente foi atribuído o valor de 1,65 g/cm³, conforme adotado por Carvalho Neto (2011).

Quanto ao parâmetro Grupo Hidrológico, todos os solos da bacia foram classificados como Grupo hidrológico C, que, de acordo com as recomendações da U.S. Natural Resource Conservation Service (Medeiros *et al.*, 2013), são solos com baixa taxa de infiltração,

condutividade hidráulica saturada entre 1 e 5 mm/h, com textura moderadamente fina a fina, que impedem o movimento da água nos horizontes. Esses solos possuem baixa taxa de transmissão de água (alto escoamento superficial potencial).

O valor para o albedo de 0,17 e as especificações das texturas dos diferentes tipos de solo foram adquiridas segundo Carvalho Neto (2011) e Medeiros *et al.* (2013), por meio da relação feita entre os solos mapeados neste trabalho com os que o referido autor define como Perfis 31, 41 e 53, correspondendo aos solos Luvisolo Crômico, Vertissolo Cromado e Neossolo Litólico, nesta ordem. Com isso, apenas alguns valores diferiram entre os tipos de solo.

3.5. Definição da seção de monitoramento do escoamento superficial, da produção de sedimentos e aplicação do modelo SWAT

A partir da aplicação do SWAT, a BESJC foi dividida 25 sub-bacias (figura 3), isto é, 25 áreas hidrologicamente homogêneas, que são responsáveis por controlar os processos de produção de sedimentos e escoamento superficial na bacia. Com base no mapa com a divisão da bacia em 25 sub-bacias foi possível gerar o mapa de produção de sedimentos para cada uma dessas áreas, mediante os valores anuais de erosão simulados pelo SWAT.

Para a calibração do modelo SWAT, foram utilizados dados observados de produção de sedimentos e escoamento superficial, coletados e medidos no exutório da Sub-bacia 19 (figura 4). Os dados de produção de sedimentos e escoamento superficial foram registrados no período de 2004 a 2006. Esse período para a simulação foi escolhido porque é o que possui a maior quantidade de eventos registrados de produção de sedimentos na Sub-bacia 19. Mais detalhes sobre o procedimento de coleta e processamento dos dados observados podem ser encontrados em Srinivasan *et al.* (2003) e Santos *et al.* (2012).

Após a preparação do banco de dados, iniciou-se a fase de aplicação do modelo, que seguiu as seguintes etapas: (a) Delimitação da bacia hidrográfica a partir do Modelo Digital de Elevação (DEM), (b) Definição das Unidades de Resposta Hidrológica (URH), com a inserção dos mapas de uso e ocupação do solo e tipos de solo, (c) Inserção dos dados climáticos; e (d) Simulação do escoamento superficial e produção de sedimentos na BESJC.

Silva, R.M. e Medeiros, I.C. (2014): "Análise hidrossedimentológica em ambiente SIG usando o modelo SWAT", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 211-231. ISSN: 1578-5157

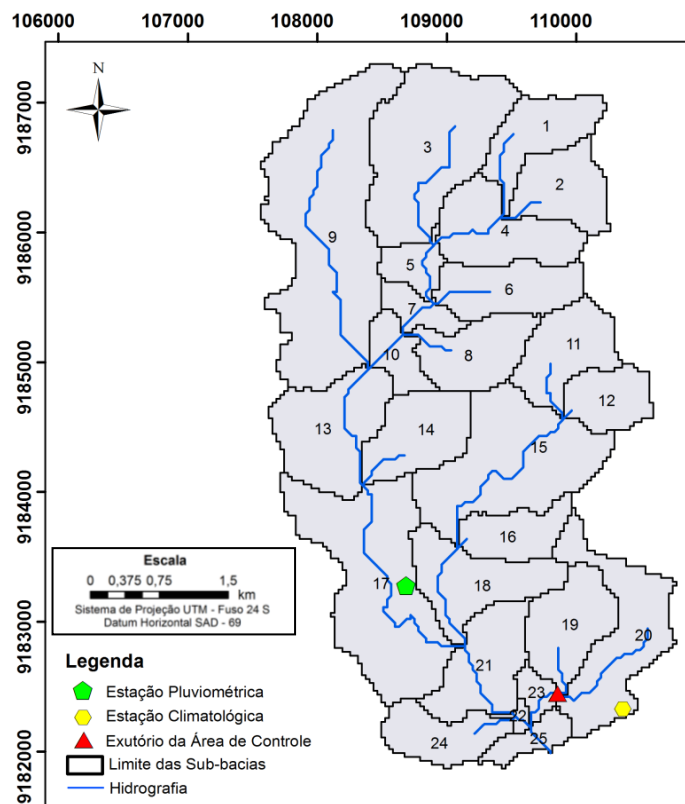


Figura 3. Mapa das sub-bacias geradas pelo SWAT, localização das estações climatológicas e da seção de monitoramento. Fonte: Os autores.



Figura 4. Exutório da Sub-bacia 19 da Bacia Experimental de São João do Cariri.
Fonte: Silva e Santos (2009).

Para testar a aplicabilidade do modelo foi utilizado o método da Calibração Manual, no qual se compara o valor calculado com o observado para cada evento. Esse método foi utilizado pelo fato dele permitir valores da literatura aos parâmetros disponíveis no banco de dados do modelo. Os parâmetros utilizados na comparação entre a produção de sedimentos observada e a calculada foram: Esco, Surlag, Sol_awc, e Alpha_bf, cujos valores otimizados foram 0,75; 1; 0,4 e 0,3, respectivamente. O parâmetro Alpha_bf representa o Fator Alfa do Fluxo de Base, que lida diretamente com o número de dias para que o fluxo subterrâneo atinja o canal; o Surlag é o coeficiente de atraso do escoamento superficial, o Esco é o fator de compensação da evaporação do solo e o Sol_awc é a capacidade de água disponível na camada do solo.

Os parâmetros utilizados, com os respectivos valores, foram: Esco (0,95); Surlag (10); Sol_awc (0,4); Alpha_bf (1); Cn2 (63); Rchrg_dp (1); Ch_k2 (10); Gwqmn (3); Gw_revap (0.1). O parâmetro Cn2 representa o valor da curva número inicial, o Rchrg_dp a fração de percolação que recarrega o aquífero profundo, o Ch_k2 corresponde à condutividade hidráulica efetiva no canal, o Gwqmn é a profundidade de água no aquífero raso para ocorrer fluxo de retorno e o Gw_revap é o coeficiente de re-evaporação da água subterrânea.

A figura 5a mostra a distribuição espacial do uso e ocupação do solo na bacia e a figura 5b apresenta o mapa com os tipos de solos da BESJC. Constatou-se que as áreas correspondentes a Vegetação Arbustiva e Vegetação Arbustivo-arbórea recobriam 73,42% do total da bacia, sendo a vegetação predominante com características do bioma da Caatinga, conforme pode ser observado na tabela 2. Verificou-se ainda que, em sua maior parte, a bacia experimental de São João do Cariri é constituída de Luvisolo Crômico, cujo total corresponde a 57,05% do território da bacia (tabela 3).

Tabela 2. Descrição do uso e ocupação do solo da Bacia Experimental de São João do Cariri

Tipos de Uso do Solo	Área (km²)	%
Solo Exposto	0,451	3,36
Água	0,495	3,69
Vegetação Arbustivo-arbórea	2,500	18,61
Urbano	0,003	0,02
Área de cultivo	1,595	11,87
Vegetação Arbustiva	7,363	54,81
Vegetação Rasteira	1,027	7,64
Total	13,433	100,00

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3. Descrição dos tipos de solos da Bacia Experimental de São João do Cariri

Tipos de Solo	Área (km²)	%
Cambissolo Háplico	0,671	5,00
Neossolo Litólico	0,196	1,46
Luvisolo Crômico	7,663	57,05
Vertissolo Cromado	4,903	36,50
Total	13,433	100,00

Fonte: Elaboração própria.

Silva, R.M. e Medeiros, I.C. (2014): "Análise hidrossedimentológica em ambiente SIG usando o modelo SWAT", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 211-231. ISSN: 1578-5157

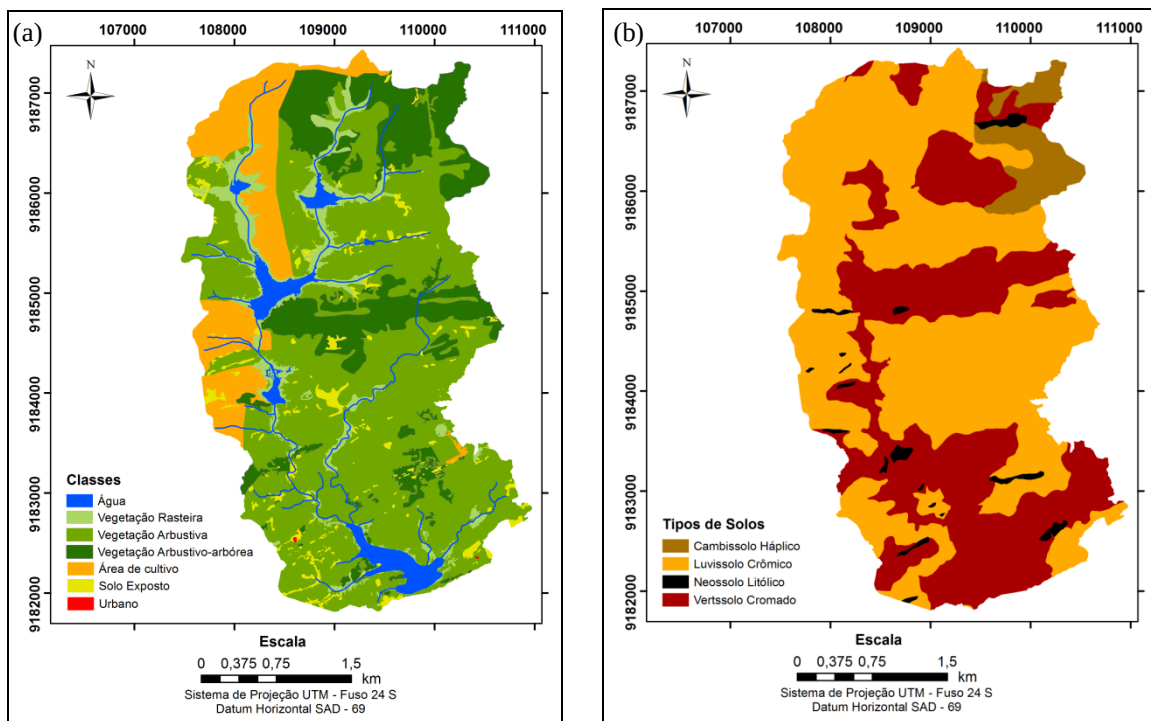


Figura 5. (a) Mapa de uso e ocupação do solo, e (b) Tipos de solos da Bacia Experimental de São João do Cariri. Fonte: Os Autores.

Neste estudo foram utilizados dados diários de precipitação de dois postos pluviométricos, e dados diários de umidade relativa do ar e de temperatura, do período entre 2004 e 2006, de uma estação climatológica instalada na bacia experimental. Para o processo de calibração e validação do modelo, selecionou-se a seção de monitoramento instalada no exutório da Sub-bacia 19, localizada na Bacia Experimental de São João do Cariri, tendo em vista que esta sub-bacia possui dados diversos observados de produção de sedimento e escoamento superficial, disponíveis para serem utilizados no processo de calibração do modelo (Silva e Santos, 2009).

3.6. Análise estatística

Para analisar os resultados do modelo SWAT, foram utilizados indicadores estatísticos para verificar o desempenho da calibração do modelo. No presente trabalho foram utilizados três métodos estatísticos para avaliar o desempenho do SWAT: o Coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE) e o Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (R^2). O COE pode ser calculado pela equação:

$$COE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \overline{E_s})^2} \right)$$

sendo E_m o evento observado, E_s é o evento simulado pelo modelo, $\overline{E_s}$ é a média do evento observado no período de simulação e n é o número de eventos. O COE pode variar de negativo infinito a 1, no qual 1 representa um perfeito ajuste. O resultado da equação indicará um desempenho satisfatório se estiver entre 0,7 e 0,85. A fim de avaliar a capacidade do modelo em representar a realidade, foi utilizada a função COE, que descreve a variância em relação aos dados observados na escala temporal, considerando as diferenças e variâncias dos valores simulados e observados. É um índice muito sensível aos valores extremos devido à segunda potência que o define, mas pouco sensível aos valores perto da média (Legates e McCabe, 1999).

O Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (R^2) mede a associação linear entre duas variáveis, sendo calculado pela da equação abaixo:

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

sendo x_i os valores observados e x_m a média destes valores, y_i os valores calculados pelo modelo e y_m a sua média. O valor obtido é adimensional, variando entre 0 e 1, onde quanto mais próximo de um o valor se apresentar, mais eficiente será a previsão.

4. Resultados e discussões

Para a BESJC foram definidas 25 sub-bacias, com áreas variando entre 0,05 e 1,7 km². Segundo Krysanova *et al.* (1998), a área de cada sub-bacia não deve exceder 100 km² a fim de garantir que alguns efeitos de escala sejam evitados, como relações entre o uso e tipos de solo, alterações atmosféricas, como também a influência da rede de drenagem e os processos de infiltração, que são controlados pelas propriedades hidrodinâmicas dos solos. Com base no MDE, foi gerado o mapa de declividade da bacia, onde a declividade média constatada foi de 5,3%, sendo as porções leste e nordeste da bacia as que apresentam as maiores declividades (figura 6).

Analisando os dados obtidos de precipitação, escoamento superficial e de sedimentos, apenas os eventos chuvosos com mais de 0,5 mm produziram escoamento superficial e sedimentos. Isso mostra que apenas eventos com maior duração e intensidade são responsáveis pela geração de escoamento superficial e produção de sedimentos. As características físicas das chuvas determinam sua erosividade, o que constitui importante fator nas relações de causa e efeito do processo erosivo dos solos, sendo sua caracterização fundamental para o planejamento conservacionista. As precipitações na região semiárida, como é o caso na BESJC, se caracterizam na maioria dos eventos por concentrarem a maior quantidade de chuva em um pequeno intervalo de tempo, caracterizando desta forma, chuvas bastante erosivas do ponto de vista do impacto das gotas de chuva no solo (Silva *et al.*, 2011). O valor médio do escoamento superficial registrado para o período entre 26/01/2004 e 31/12/2006 foi igual a 0,04 m³/s, e a produção de sedimentos média foi de 18 kg, para cada evento observado.

Silva, R.M. e Medeiros, I.C. (2014): "Análise hidrossedimentológica em ambiente SIG usando o modelo SWAT", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 211-231. ISSN: 1578-5157

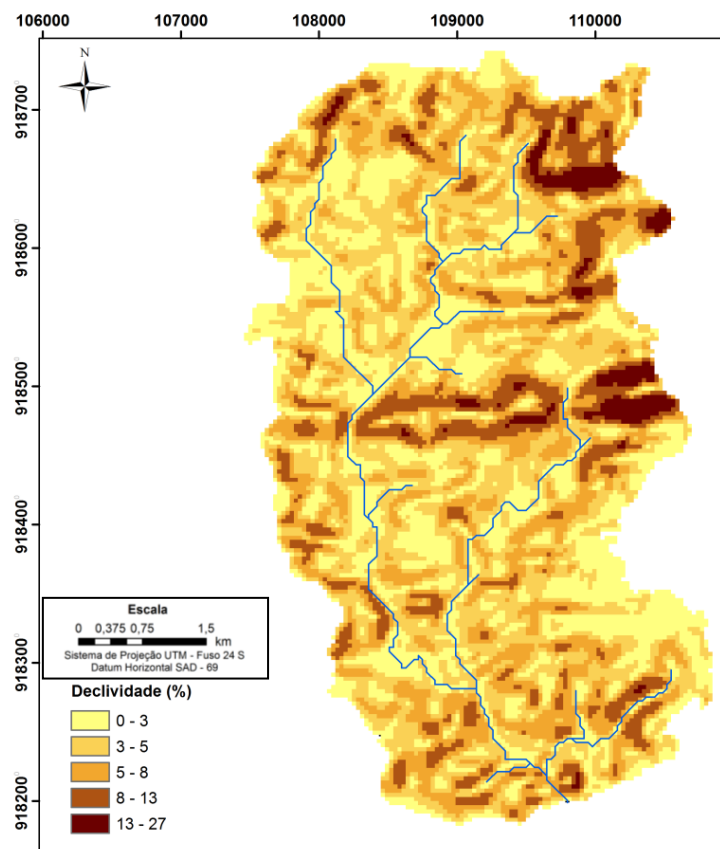


Figura 6. Mapa de declividade da Bacia Experimental de São João do Cariri.

Fonte: Os Autores.

Após o início das simulações observou-se que os escoamentos simulados e observados estavam desajustados. Para tanto, iniciou-se o ajuste dos parâmetros do modelo SWAT. Para a determinação dos melhores valores dos parâmetros do modelo SWAT foram realizadas 90 iterações no processo de calibração. Essa etapa foi orientada, majoritariamente para a diminuição das incongruências entre os escoamentos observados e calculados, assim, iniciou-se a alteração dos parâmetros físicos do solo. Os parâmetros mais sensíveis e com maior influência sobre o escoamento superficial e também na produção de sedimentos foram: Surlag – coeficiente de atraso do escoamento superficial (dias); Alpha_Bf – constante de recessão (dias); Ch_K2 – efetividade da condutividade hidráulica do canal principal; Esco – fator de compensação da evaporação do solo; Sol_Awc – capacidade de água disponível (mm água/mm solo); Cn2 – valor do curva número inicial do Soil Conservation Service; Slope – declividade média mais acentuada (mm/m); Gw-Revap – Coeficiente de re-evaporação da água subterrânea; Ssubbsn – Comprimento da declividade média (m).

As figuras 7a–7c mostram a comparação entre os escoamentos superficiais diários observados e calculados para a seção de monitoramento na sub-bacia 19. No período entre 26/01/2004 a 31/12/2006. Analisando o hidrograma, observou-se que houve coincidência entre a maioria dos eventos extremos de escoamento superficial. Com relação ao ajuste entre os volumes

escoados observado e o calculado, os valores foram muito próximos, sendo 0,04 m³/s para o observado e 0,05 m³/s para o calculado. Observa-se também que não houve um bom ajuste nos valores máximos em alguns picos de escoamento registrados durante esse período, que pode ser atribuído a dificuldades de simulação do modelo ou a incertezas nos dados de entrada, mas, em termos gerais, a comparação entre os escoamentos superficiais observados e calculados tiveram um bom ajuste para as condições climáticas, geomorfológicas e de propriedades hidrodinâmicas dos solos da BESJC.

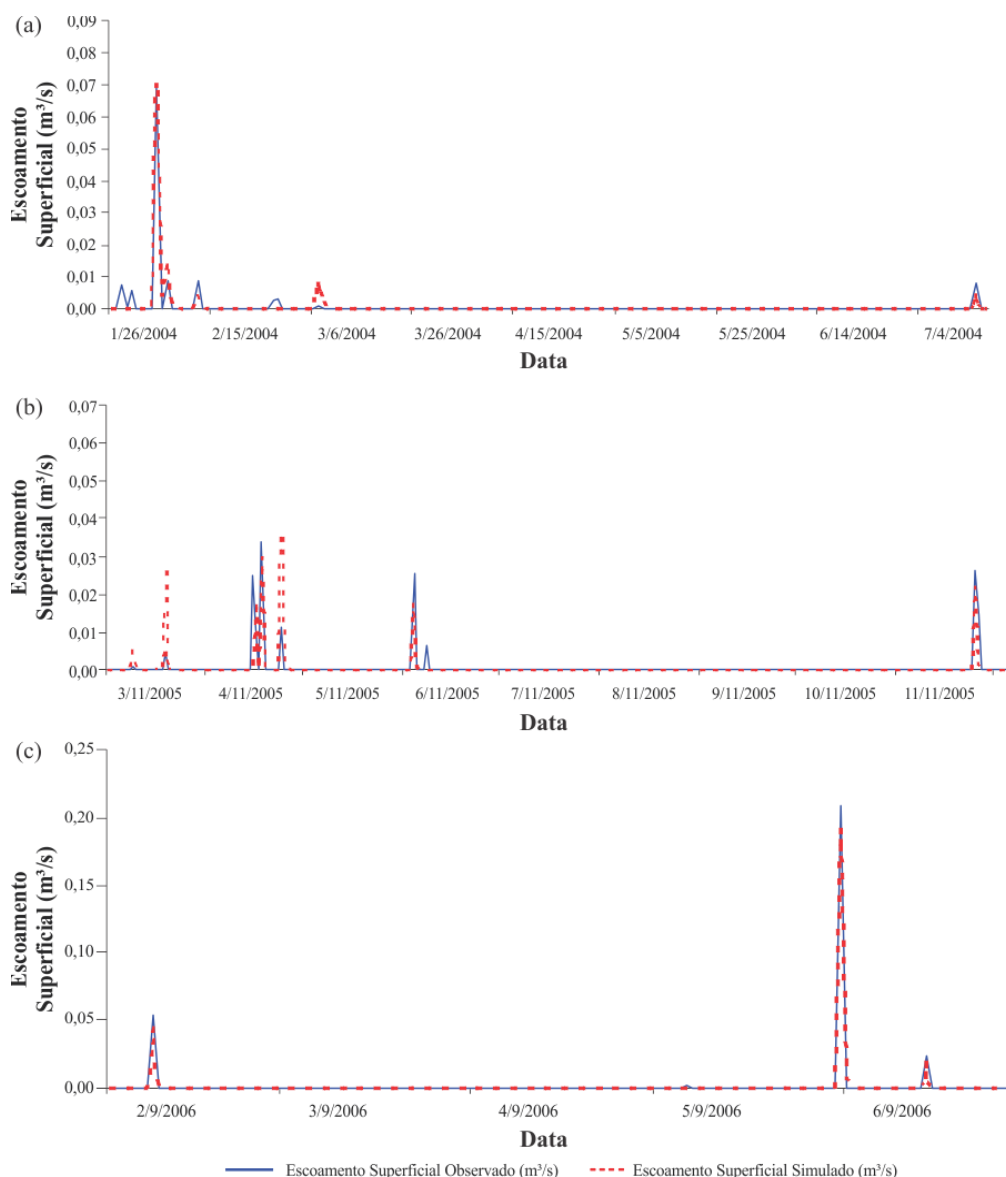


Figura 7. Relação entre o escoamento superficial observado e o simulado para os anos de a) 2004, b) 2005 e c) 2006. Fonte: Os autores.

As figuras 8a–8c mostram a comparação entre a produção de sedimentos diária observada e a calculada para a seção de monitoramento no mesmo período. Os resultados obtidos entre a produção total de sedimentos foi de 430,44 kg para a calculada e 432,10 kg para a observada, isto é, o modelo conseguiu representar satisfatoriamente a produção total de sedimentos no período estudado. Entretanto, percebe-se no sedigrama deslocamentos dos picos de produção de sedimentos calculada, o que mostra que essa bacia se caracteriza por um retardamento maior no transporte de sedimentos nos canais da bacia, que pode ser atribuído ao tamanho dos grãos de sedimentos da bacia e pelo fato da demora no tempo de umedecimento do solo. A comparação diária entre a produção observada e a calculada se mostrou promissora, apresentando coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,84.

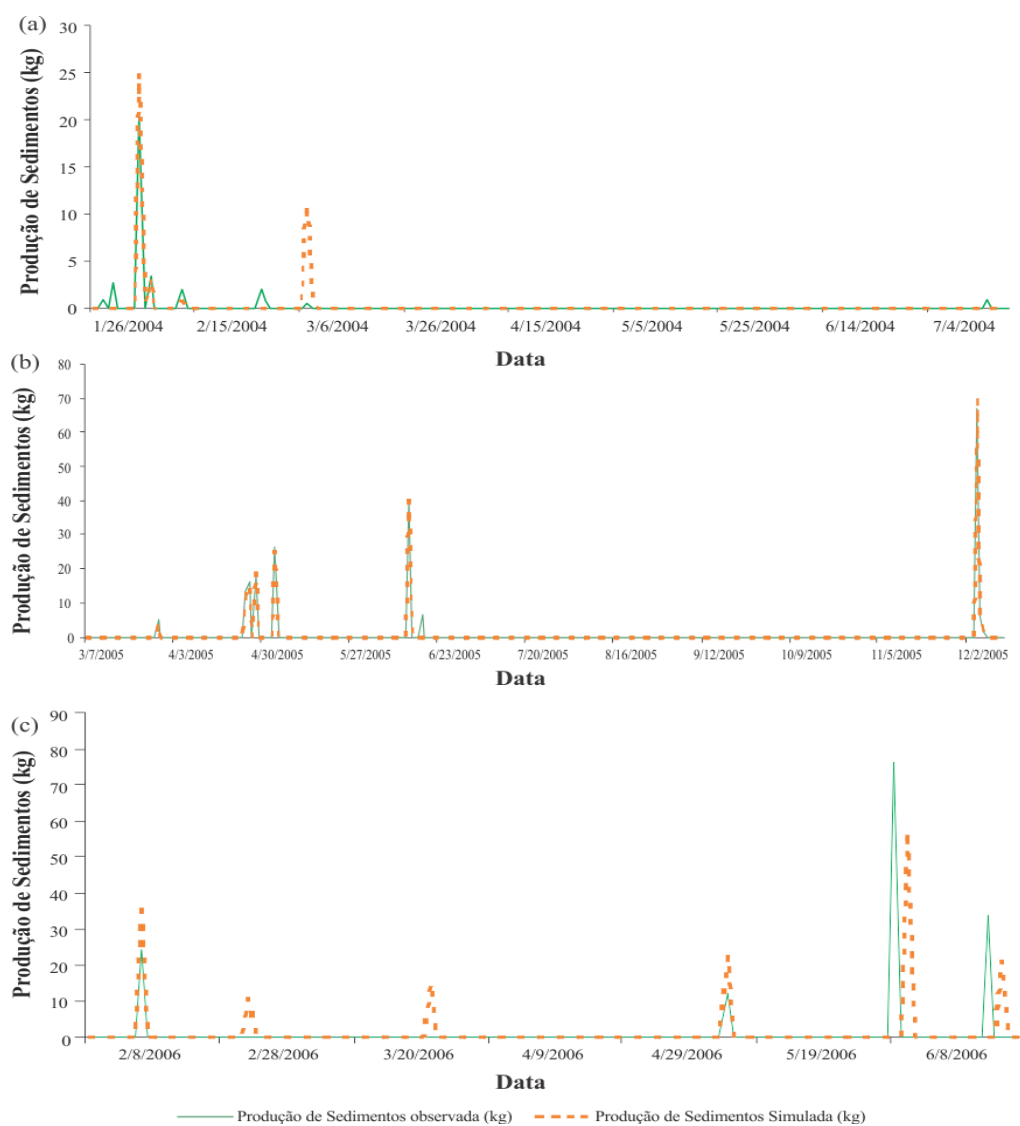


Figura 8: Relação entre a produção de sedimentos observada e a simulada para os anos de a) 2004, b) 2005 e c) 2006. Fonte: Os Autores.

Ao analisar graficamente os resultados das figuras 7 e 8, é possível identificar que os valores diários simulados seguem a tendência dos valores medidos, principalmente para a simulação das vazões. Considerando que os resultados estatísticos e gráficos apresentados se referem à execução inicial do modelo, foi considerado que o modelo apresentou boa aderência para os valores médios diários e tem grande potencial para ser usado em outras bacias da porção semiárida da Paraíba, e que dados de uso do solo com alta resolução espacial são importantes produtos para a modelagem hidrossedimentológica em bacias hidrográficas.

A Tabela 4 apresenta a comparação entre os indicadores estatísticos para a calibração do escoamento superficial e da produção de sedimentos, por meio do método de calibração manual no SWAT. Vale salientar que a Calibração Manual é mais complexa em termos de ajuste, uma vez que é preciso testar cada parâmetro diversas vezes até que se obtenha um resultado aceitável e requer mais conhecimento sob as propriedades hidrodinâmicas do solo e dos processos hidráulicos e da interação da geomorfologia e geologia da área de estudo.

Tabela 4. Comparação entre as análises estatísticas

Indicador Estatístico	Escoamento Superficial	Produção de Sedimentos
R ²	0,88	0,84
COE	0,77	0,03

Fonte: Os autores.

Realizada a calibração do modelo SWAT para a produção de sedimentos na BESCJ, foi possível gerar o mapa de produção de sedimentos para todas as demais sub-bacias (figura 9). Analisando-se o mapa gerado, observou-se que as áreas que apresentaram maior produção de sedimentos foram as sub-bacias 21 e 25, que são as sub-bacias localizadas próximas ao exutório da BESCJ, e recebem toda a produção de sedimentos à montante.

As áreas que apresentaram os menores valores de produção de sedimentos se caracterizam pela presença de vegetação arbustiva e vegetação arbustivo-arbórea (sub-bacias 1, 2, 6, 8, 11, 12, 14, 16, 19, 20 e 24), totalizando uma área de 4,5 km², o que representa 33% da área total da bacia, mostrando a influência da cobertura vegetal sobre o processo erosivo no semiárido. Os resultados sobre a influência da cobertura vegetal na proteção do solo contra a erosão dos solos comprovaram a importância da preservação da vegetação do tipo caatinga na proteção do solo, garantindo a interceptação das chuvas, diminuição da infiltração e do escoamento superficial (Silva *et al.*, 2011). Vale destacar que as áreas onde ocorrem o plantio de Algaroba (sub-bacias 9 e 13), apresentaram uma quantidade de sedimentos variando entre 306 a 486 kg/ano, o que pode ser considerado uma bacia com produção de sedimentos média.

O uso do MDE com resolução espacial de 30 m baseado em sensoriamento remoto é de extrema relevância para aplicações de modelagem hidrossedimentológica. Entretanto, convém destacar que a área da bacia é considerada pequena (13,5 km²), e que os produtos elaborados nessa resolução espacial não permitem análises mais detalhadas da influência dos processos geomorfológicos na geração do escoamento superficial e, consequentemente, na produção de sedimentos. Atenção especial deve ser dada aos resultados do ajuste do COE com relação aos dados de erosão, pois, os mesmos apresentaram resultados inconsistentes.

Os resultados obtidos neste estudo indicam uma cautela quanto ao uso do MDE como dado de entrada para simulação com o modelo SWAT, pois a localização de um processo hidrossedimentológico é de suma importância, uma vez que é possível ocorrer uma atribuição equivocada quanto a distribuição quantitativa e qualitativa da erosão do solo em uma bacia hidrográfica a depender do MDE utilizado.

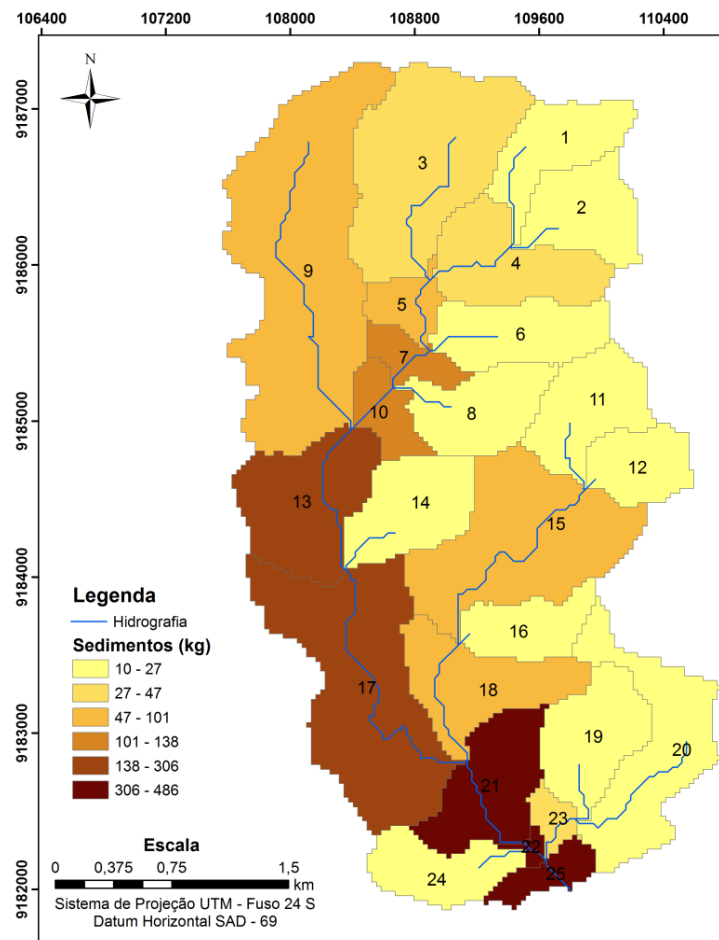


Figura 9. Mapa de produção de sedimentos para cada sub-bacia da área de estudo.

Fonte: Os autores.

5. Conclusões

A aplicação do modelo SWAT para a avaliação do escoamento superficial mostrou-se satisfatório, visto que o resultado simulado aproximou-se do observado. Por outro lado, verifica-se uma discrepância a produção de sedimentos observada e a calculada, principalmente nos picos. Conclui-se também do exposto que, o uso de mapas do uso do solo com alta resolução espacial (1 m), e MDE com resolução espacial moderada (30 m), são dados de entrada de extrema valia em

modelos hidrossedimentológicos acoplados a um SIG, pois servem para uma melhor representação do uso e ocupação do solo e da topografia de uma bacia hidrográfica e, conseqüentemente, para a modelagem dos processos de chuva-vazão-erosão.

Neste contexto, é primordial que estudos mais detalhados sobre os parâmetros físico-químicos dos solos possam ser utilizados na calibração do modelo. Conclui-se ainda que o método de calibração manual mostrou-se eficaz, apesar de ser um trabalho mais delicado e complexo.

Referências bibliográficas

Alcoforado-Filho, F.G., Sampaio, E.V.S.B. e Rodal, M.J.N. (2003): "Florística e fitossociologia de um remanescente de vegetação caducifolia espinhosa arbórea em Caruaru, Pernambuco", *Acta Botânica Brasilica*, 17, 2, pp. 287-303.

Braga, A.C.F.M., Silva, R.M., Santos, C.A.G., Galvão, C.O. e Nobre, P. (2013): "Downscaling of a global climate model for estimation of runoff, sediment yield and dam storage: a case study of Pirapama Basin, Brazil", *Journal of Hydrology*, 498, 1, pp. 46-58.

Carvalho Neto, J.G. (2011): *Simulação Hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados Com o Modelo SWAT*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande.

Chaves, L.H.G., Chaves, I.B. e Vasconcelos, A.C.F. (2002): *Salinidade das águas superficiais e suas relações com a natureza dos solos na Bacia Escola do açude Namorados*. Campina Grande: BNB/UFPB, 54 p. (Boletim Técnico).

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (1999): *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília, Embrapa Produção de Informação, Rio de Janeiro, Embrapa solos, 412 p.

Ezz-Aldeen, M. e Al-Ansari, N. (2013): "Application of SWAT model to estimate the sediment load from the left bank of Mosul Dam", *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, 3, 1, pp. 47-61.

Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D.I. e Becker, A. (1998): "Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds", *Ecological modelling*, 106, 2, pp. 261-289.

Legates, D.R. e McCabe, G.J. (1999): "Evaluating the use of 'goodness of fit' measures in hydrologic and hydroclimatic model validation", *Water Resources Research*, 26, 1, pp. 69-86.

Medeiros, I.C., Xavier, A.P.C., Silva, A.M., Santos, C.A.G. e Silva, R.M. (2013): "Simulação da produção de sedimentos utilizando dados de entrada de alta resolução espacial no modelo SWAT", *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Bento Gonçalves, ABRH, pp. 1-8.

Ministério da Agricultura (1972): *Levantamento Exploratório – Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba*. Rio de Janeiro; Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo (MA), 670 p.

Paes-Silva, A.P. (2002): *Cobertura vegetal da bacia hidrográfica do açude Namorado no Cariri paraibano*. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água), Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba.

Silva, R.M. e Medeiros, I.C. (2014): "Análise hidrossedimentológica em ambiente SIG usando o modelo SWAT", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 211-231. ISSN: 1578-5157

Paiva, F.M.L., Srinivasan, V.S., Santos, C.A.G. e Silva, R.M. (2011): "Estimativa de valores regionais dos parâmetros do solo do modelo Kinneros2 para o semiárido paraibano", *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 16, 2, pp. 141-150.

Rawls, W.J. e Saxton, K.E. (1982): "Estimation of soil water properties", *Journal of Irrigation and Drainage*, 25, 5, pp. 1316-1320.

Santos, L.L., Srinivasan, V.S. e Aragão, R. (2012): "Modelagem hidrossedimentológica no semi-árido paraibano utilizando o modelo WEPP e o efeito de escala sobre os seus parâmetros", *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17, 1, pp. 53-63.

Silva, R.M. e Santos, C.A.G. (2009): "Influência da cobertura vegetal nos processos hidrossedimentológicos no semiárido do nordeste, Brasil", *Perspectiva Geográfica*, 5, 2, pp. 113-125.

Silva, R.M., Montenegro, S.M.G.L. e Santos, C.A.G. (2012): "Integration of GIS and remote sensing for estimation of soil loss and prioritization of critical sub-catchments: a case study of Tapacurá catchment", *Natural Hazards*, 62, 6, pp. 953-970.

Silva, R.M., Santos, C.A.G. e Montenegro, S.M.G.L. (2013a): "Identification of critical erosion prone areas and estimation of natural potential for erosion using GIS and Remote Sensing", *Revista Brasileira de Cartografia*, 65, 2, pp. 125-136.

Silva, R.M., Santos, C.A.G. e Srinivasan, V.S. (2011): "Perdas de água e sedimento em diferentes sistemas de manejo no semiárido da Paraíba", *Mercator*, 10, 21, pp. 161-170.

Silva, R.M., Santos, C.A.G., Silva, V.C.L. e Silva, L.P. (2013b): "Erosivity, surface runoff, and soil erosion estimation using GIS-coupled runoff-erosion model in the Mamuaba catchment, Brazil", *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 8, pp. 8977-8990.

Silva, V.C.L., Silva, L.P., Silva, R.M. e Santos, C.A.G. (2011): "Delimitação automatizada e aplicação do modelo AVSWAT para a Bacia do Rio Mamuaba", *XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Maceió, ABRH, pp. 1-17.

Souza, R.M., Santos, I. e Kobiyama, M. (2009): "O modelo SWAT como ferramenta para a gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do altíssimo rio negro", *XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, São Paulo, ABRH, pp. 1-16.

Srinivasan, V.S., Santos, C.A.G. e Galvão, C.O. (2003): "Erosão hídrica do solo no semi-árido brasileiro: a experiência na Bacia Experimental de Sumé", *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 8, 2, pp. 57-73.

Valeriano, M.M. (2005): "Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o Projeto TOPODATA". *XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, INPE, pp. 1-8.

Valeriano, M.M., Rossetti, D.F. e Albuquerque, P.C.G. (2009): "Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional", *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, INPE, pp. 1-8.

Williams, J.R. (1975): "Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor", in USDA-ARS S-40: *Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources*. Washington, pp. 244-252.

Silva, R.M. e Medeiros, I.C. (2014): “Análise hidrossedimentológica em ambiente SIG usando o modelo SWAT”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 14 , p. 211-231. ISSN: 1578-5157

Wischmeier, W.H. e Smith, D.D. (1965): *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planting*. Washington: USDA, Agriculture Handbook, 537, 58 p.

Xavier, A.P.C., Silva, A.M., Medeiros, I.C., Maranhão, K.U.A. e Silva, R.M. (2013): “Análise multitemporal e atualização do mapa de uso e ocupação do solo do município de Monteiro-PB”, *XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Foz do Iguaçu, INPE, pp. 1-8.