

Avaliação da Produção e Aporte de Sedimentos para o Rio Potengi, RN

Rodrigo de Oliveira Santos¹; Ada Cristina Scudelari¹; Cynara de Lourdes da Nobrega Cunha²;
Antonio Marozzi Righetto¹

rodrigo.oliveira@gmail.com ; ada@ct.ufrrn.br ; cynara@ufrn.br ; righetto@ct.ufrrn.br

Recebido: 29/05/12 - revisado: 06/11/12 - aceito: 10/05/13

RESUMO

Este trabalho avalia a aplicabilidade do modelo SWAT para estimar a distribuição da produção de sedimento ao longo da bacia hidrográfica do rio Potengi (BHRP) e a sua contribuição para o estuário, fazendo um paralelo com a suscetibilidade à erosão hídrica da mesma bacia. O SWAT foi executado para um período de cinco anos (1997 – 2001). Os resultados foram analisados em termos de escoamento superficial, produção de sedimento e propagação dos sedimentos ao longo dos trechos de rio. Com os resultados das simulações, comparados ao mapa de suscetibilidade à erosão, foi possível constatar que as porções de cabeceira oeste da bacia e do baixo rio Potengi retornaram os maiores valores de produção de sedimentos, alcançando 2,8 e 5,1 t/ha.ano, respectivamente, enquanto que a região central foi considerada a menos suscetível à erosão e que a gera menor carga de sedimento, não superando 0,7 t/ha.ano. Verificou-se ainda que nas sub-bacias mais a oeste da bacia, onde se revelam as nascentes da rede hídrica, a produção de sedimentos é impulsionada, naturalmente, pelas grandes declividades aliadas aos solos frágeis. Já para a região leste da bacia os resultados sugerem que, por força de sua própria natureza, essa região não contribuiria significativamente com aporte de sedimentos para o rio Potengi, de forma que a maior parte dos sedimentos produzidos é consequência das atividades antrópicas. Para a porção central da bacia, a análise da propagação de sedimentos aponta para um predomínio da deposição em detrimento do transporte, a partir do que se conclui que muito difícilmente um evento de chuva que ocorra no alto rio Potengi contribuirá significativamente com aporte de sedimento para o estuário do rio.

Palavras Chave: Produção de Sedimentos. SWAT. Rio Potengi.

INTRODUÇÃO

Dentre os rios que desaguam no litoral leste do Estado do Rio Grande do Norte (RN), destaca-se o Rio Potengi, pela sua extensão (mais de 170 Km, atravessando diversos municípios e diferentes configurações de paisagens), e, sobretudo porque às margens de seu estuário localiza-se o município de Natal, capital do Estado, com mais de 806.000 habitantes, representando cerca de 25% da população total do RN (IBGE, 2010).

Neste estuário está instalado o Porto de Natal, o qual representa uma peça importantíssima para a economia do Estado. Na região do porto, a profundidade do canal é fator crucial para operação de entrada e saída de embarcações.

Sabe-se que os estuários, em geral, constituem um ambiente de destino propício para a acomodação de sedimentos finos, coesivos, silte e argila (DYER, 1997). Consequentemente, interferências antrópicas, a exemplo do desenvolvimento de obras hidráulicas inadequadas, da ocupação desordenada do solo e de seu uso indiscriminado para atividades agropecuárias na bacia de contribuição, podem intensificar o aporte de sedimentos nos estuários, culminando em redução de suas profundidades, larguras e declividades de canal, alteração da qualidade das águas e dos ecossistemas.

Desta forma, é de fundamental importância que estudos relacionados às questões sedimentológicas associadas aos processos erosivos sejam realizados focando na avaliação das condições da bacia hidrográfica contribuinte do ponto de vista de seu potencial de produção de sedimentos.

Nesse sentido, sempre que se pretende investigar fenômenos distribuídos no espaço e no tempo, como é o caso das avaliações aplicadas a bacias hidrográficas, é comum que se empreguem modelos que simulem os processos pertinentes, bem

¹ UFRN/PPgES

² UFPR/LEMMA/PPGEA

como as interações entre os mesmos. Isso porque a quantidade de medições de campo necessárias ao se considerar a ausência de modelos de simulação, em geral, tornaria financeiramente proibitiva a maioria dos projetos de avaliação, planejamento e manejo de bacia hidrográfica (PRADO, 2005).

Os modelos aplicados a bacias hidrográficas são capazes de propiciar um melhor entendimento das relações entre as atividades de uso do solo e os processos intervenientes na qualidade dos recursos hídricos inseridos na bacia em estudo (IM *et al.*, 2003). Quando bem aplicada, a modelagem torna-se um instrumento integrador da complexidade dos sistemas ambientais, sendo capaz de lidar com a dinâmica dos processos naturais.

A priori, o modelo SWAT, *Soil and Water Assessment Tool* (ARNOLD *et al.*, 1998; GASSMAN *et al.*, 2007), amplamente conhecido e utilizado em diversas partes do mundo, aparece como uma possível ferramenta para avaliar a produção e o aporte de sedimentos para o estuário do Rio Potengi, bem como a relação entre a produção de sedimentos e as formas predominantes de cobertura do solo.

Entretanto, é preciso considerar que qualquer processo de modelagem carrega consigo um grau de incerteza, em função da qualidade dos dados de entrada, das abstrações do modelo e da heterogeneidade natural das bacias hidrográficas (ARABI *et al.*, 2007). Na verdade, um dos maiores empecilhos para a execução de simulações hidrológicas em bacias hidrográficas é a etapa de composição de grande quantidade de dados e parâmetros necessários para representar a complexidade dos sistemas naturais e dos atributos específicos de uma determinada região (MACHADO e VETTORAZZI, 2003), podendo comprometer proibitivamente a aplicabilidade de um modelo.

Nesse contexto, sabe-se que a carência de dados, ou de uma cultura de registros históricos, é uma questão bastante recorrente dentro do contexto dos países em desenvolvimento. No Brasil, essa situação não é diferente, sobretudo para as regiões mais afastadas dos polos econômicos, como é o caso do Norte e do Nordeste do país.

Diante disso, este trabalho avalia a aplicabilidade do modelo SWAT, fazendo interface com Sistema de Informações Geográficas (SIG), para estimar, mesmo que de forma preliminar, a produção de sedimentos ao longo da bacia hidrográfica do Rio Potengi (BHRP) e a sua contribuição para o estuário, mostrando que a aplicação dessa ferramenta pode ser utilizada, sobretudo para fins de planejamento e gestão da bacia.

DESCRIÇÃO DA ÁREA

A BHRP está situada no nordeste setentrional brasileiro, no Estado do Rio Grande do Norte, e apresenta uma área de aproximadamente 4.100 Km², IDEMA (2010), ressaltando, em seu estuário a presença do município de Natal (Figura 1).

Geomorfologicamente, a BHRP é constituída predominantemente por três unidades principais (Figura 2), a saber: *Tabuleiros Costeiros*, ocupando 8% da área; *Depressão Sertaneja*, ocupando 53% da área; e *Planalto da Borborema*, que se manifesta em 34% do território. Além dessas unidades, também se apresentam, em menor escala, a *Planície Fluvio-marinha*, na região estuarina do Rio Potengi, a *Planície Fluvial*, mais à montante, atravessando os Tabuleiros Costeiros, as *Dunas fixas* e as *Áreas Urbanizadas*, ocupando todas juntas uma área de 8%, (IDEMA, 2010).

Os Tabuleiros Costeiros são definidos por formas tabulares, com altitudes entre 70 e 100 m, localizadas no baixo curso do Rio Potengi, nas quais se manifestam entalhes fracos de drenagem. Seu relevo se impõe principalmente de forma plana e suave-ondulada, favorecendo, assim, a ação dos processos de escoamento superficial difuso, a erosão laminar e a infiltração das águas e de material de granulometria fina. Dessa maneira, em geral, estas áreas são, naturalmente, de baixa predisposição à erosão. Entretanto, a ocupação humana, na forma de atividades agrícolas, tem incrementado sua suscetibilidade aos processos erosivos.

A Depressão Sertaneja, localizada na parte central da BHRP, apresenta uma área dissecada, constituída de pequenos interflúvios tabulares, limitando-se ao leste pelos Tabuleiros Costeiros, de forma gradual e sem rupturas topográficas perceptíveis, e a oeste com a unidade Planalto da Borborema; contato, este, caracterizado por uma acentuada discrepância altimétrica.

No Planalto da Borborema, unidade de maior altitude presente na BHRP, prevalece a litologia Pré-Cambriana do Complexo Cristalino, com aparições de pequenas manchas sedimentares. Essa unidade compõe o extremo oeste da BHRP, e em seu bordo se situa a cabeceira do Rio Potengi, a partir da qual segue na forma de cursos rápidos e de corredeiras até atingir as áreas baixas da Depressão Sertaneja, sendo, de tal modo, fonte para o fornecimento do material de esparriamento.

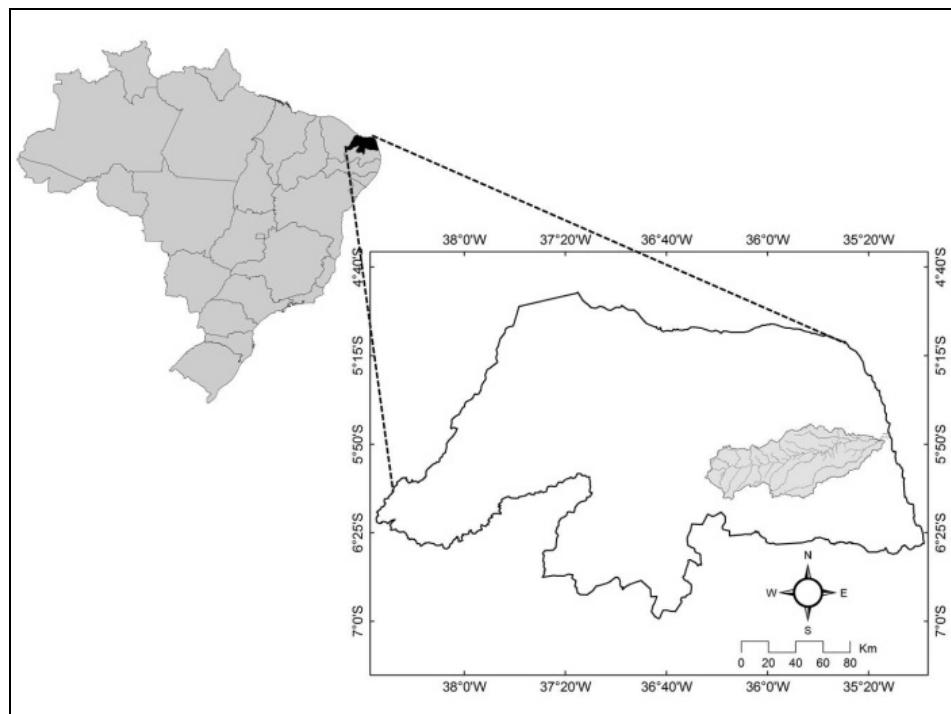


Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do Rio Potengi (BHRP).

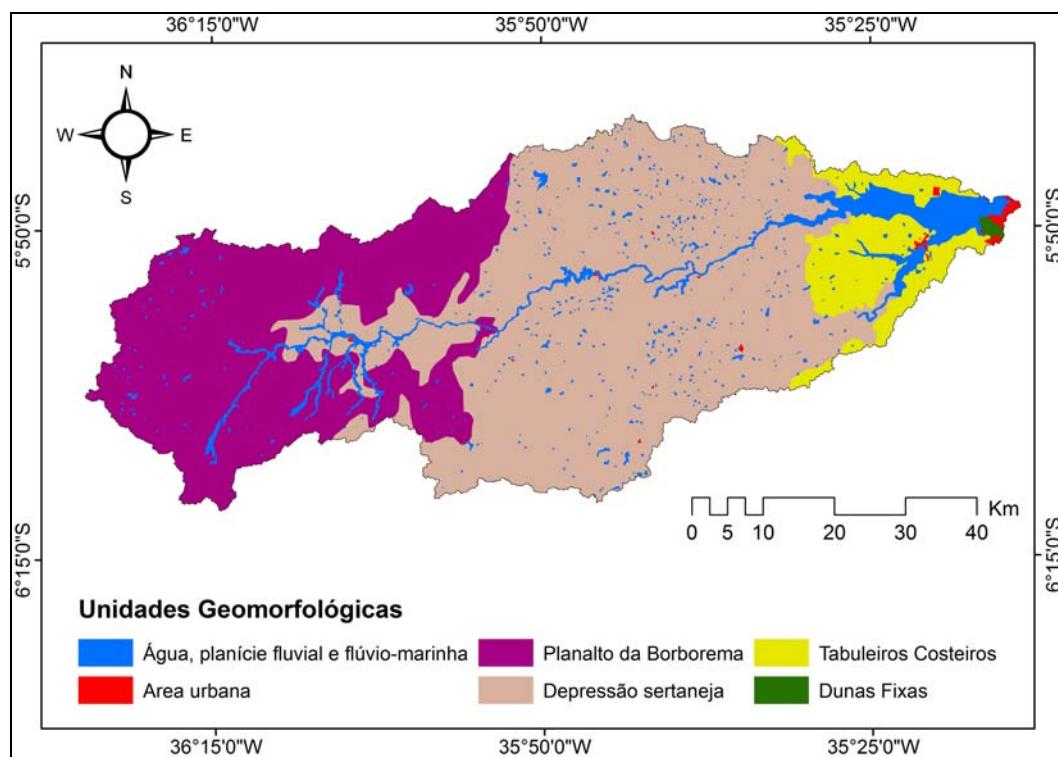


Figura 2 - Unidades geomorfológicas presentes da bacia hidrográfica do Rio Potengi (BHRP).

Litologicamente, a porção oeste da bacia, onde se encontra o Planalto da Borborema, que também é onde se manifestam as maiores declividades, é composta, predominantemente, por solos mais frágeis, ou mais suscetíveis à erosão hídrica, mormente os solos do tipo Neossolo Litólico e Luviissolo Crômico Órtico, segundo a classificação brasileira de solos (EMBRAPA, 1999). Já a porção central e a leste da bacia apresentam solos menos suscetíveis, predominando o Argissolo Vermelho-amarelo e o Planossolo Haplólico, cuja soma da área de ambos compreende quase 50% do total da bacia.

Pela classificação climática de Köppen, o clima da região, assim como em todo o Estado do Rio Grande do Norte, é predominantemente semiárido muito quente, sendo que no extremo oeste, compondo 10% de toda a bacia, prevalece o semiárido do tipo BSw' h' e na porção central da bacia, contemplando a unidade geomorfológica da Depressão Sertaneja, predomina o tipo BSs' h'. Apenas na região litorânea, parcela leste da BHRP, onde se localiza o estuário, predomina o clima quente e úmido do tipo As'. As temperaturas em toda a BHRP apresentam uma considerável homogeneidade espacial, com variação pouco significativa, considerando que suas isotermas médias oscilam entre 24° e 27°C. Já as precipitações, ao contrário do que ocorre com a temperatura, apresentam uma grande variação, decrescendo do litoral, Tabuleiros Costeiros, em direção ao Planalto da Borborema. Segundo a SERHID (1998), os dados de chuvas anuais médias oriundos de séries históricas de longo período apontam para um decréscimo em seus valores partindo do litoral em direção ao interior, variando de aproximadamente 1.300 mm na foz até 500 mm nas caibeiras.

Dentre os tipos de vegetação encontrados na BHRP, a Caatinga é, de longe, a mais expressiva, chegando a ocupar cerca de 80% do território da bacia. Trata-se de um bioma intimamente associado ao clima semiárido e que se apresenta através de árvores e arvores de porte relativamente pequeno, distribuídas esparsamente em conjunto com plantas suculentas e com um estrato arbustivo e herbáceo estacional. Todavia, a Caatinga vem sofrendo o impacto antrópico, de maneira que sua supressão tem sido crescente, seja em prol do desenvolvimento de cultivos ou da pecuária, seja para o uso de seu material lenhoso enquanto biomassa energética, alimentando fornos residenciais, de cerâmicas e de outros empreendimentos. Além da Caatinga, manifestam-se, sobretudo no leste da bacia, pequenos fragmentos de floresta estacional semideciduval, vegetações an-

tropizadas ou em regeneração, áreas ocupadas por agricultura, pastagens e mangues.

As especificidades ambientais que demarcam as unidades geomorfológicas da BHRP, dentre as quais se destacam o relevo, o clima, o solo e sua cobertura, revelam a possibilidade de utilizar as mesmas unidades como zonas distintas ou subsistemas de avaliação dos processos erosivos, antes da definição das sub-bacias, sendo, estas últimas, moldadas a partir das características topográficas e da rede de drenagem.

SUSCETIBILIDADE À EROSÃO HÍDRICA

A identificação dos níveis de suscetibilidade à erosão pode servir de respaldo para o planejamento de ações voltadas para o manejo e o monitoramento de uma bacia hidrográfica, bem como para facilitar o direcionamento de investimentos para áreas consideradas prioritárias.

Todos os aspectos físicos, naturais e antrópicos da BHRP se combinam complexamente e constituem, por conseguinte, seus próprios padrões de suscetibilidade à erosão hídrica.

Santos e Scudelari (2011) avaliaram qualitativamente a suscetibilidade à erosão hídrica da BHRP a partir da sobreposição ponderada de critérios naturais e da componente antrópica, manifestada através da cobertura do solo.

Dessa forma, cada critério foi estimado e classificado, por meio de ferramentas de SIG, segundo sua capacidade de contribuir para com os processos erosivos capazes de provocar perda de solo e produção de sedimentos.

Entre os critérios naturais foram avaliados a *erosividade* das chuvas, impondo-se enquanto agente ativo da erosão; a *erodibilidade* dos solos, que está relacionada com a resistência dos solos aos processos erosivos, considerando suas propriedades granulométricas e hídricas; a distribuição das *declividades*, sendo uma derivação da natureza do relevo.

Avaliou-se, ainda, o critério *cobertura do solo*, a fim de considerar a interferência das atividades humanas sobre a cobertura natural.

A sobreposição desses critérios, pensada como forma de consolidar uma análise multicriterial, foi realizada através de álgebra de mapas, seguindo o que preconiza o método *Analytical Hierarchy Process* (AHP), proposto por Saaty (SAATY, 2006). Na realidade, o método AHP serviu de respaldo para atribuição de ponderações de importância a cada critério, partindo da premissa de que os mesmos contribuem com relevâncias hierarquicamente diferentes no que diz respeito aos processos erosivos.

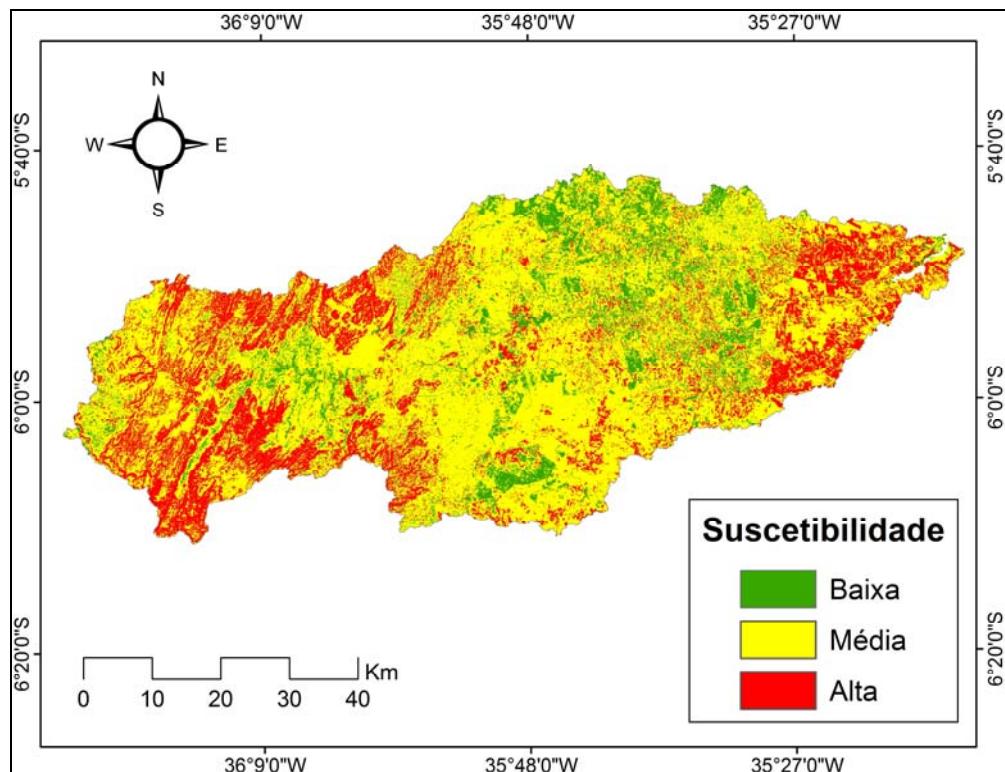


Figura 3 - Distribuição da suscetibilidade à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio Potengi (BHRP).

Como resultado da análise, obteve-se o mapa de suscetibilidade à erosão hídrica (Figura 3), que apresenta a região central como sendo a porção de menor suscetibilidade, enquanto que as áreas mais suscetíveis da bacia estão situadas na cabeceira oeste da bacia, região do Planalto da Borborema, porção com maiores declividades, e na região mais ao leste, na qual ocorrem mais interferências antrópicas na cobertura do solo, seja na forma de urbanização, seja através de cultivos ou da atividade pecuária (SANTOS; SCUDELARI, 2011).

DESCRIÇÃO E APLICAÇÃO DO SWAT

O modelo SWAT foi concebido pelo *United States Department of Agriculture* (USDA) e, estando em constante desenvolvimento desde a primeira metade da década de 1990, tem sido consolidado com sucesso no que concerne à avaliação dos recursos hídricos e da poluição oriunda de fontes pontuais ou difusas em bacias hidrográficas (NEITSCH *et al.*, 2005). Esse modelo vem sendo empregado satisfatoriamente para diversas situações em várias regiões do mundo para vários fins, a exemplo de análises de capacida-

de de suporte de cursos hídricos, avaliação da eficiência dos planos integrados para conservação de recursos hídricos, estudos da influência de cenários de uso do solo na poluição hídrica, estudos de impactos hidrológicos provocados pela mudança climática, etc. (GASSMAN *et al.*, 2007).

Originalmente, o SWAT foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a influência e quantificar o impacto das práticas de manejo do solo em bacias hidrográficas grandes e complexas, considerando sua heterogeneidade no que concerne à sua conformidade física (tipo de solo, topografia, uso e ocupação, condições de manejo e clima) em um longo período de tempo (ARNOLD; ALLEN, 1996; ARABI *et al.*, 2007b).

Para tanto, de acordo com Chen e MacKay (2004), o SWAT faz uso estratégico de sub-modelos, a fim de que suas simulações hidrológicas consigam representar a complexidade dos sistemas naturais.

Entre os componentes do modelo estão incluídos: hidrologia, clima, cobertura do solo, erosão, produção de sedimentos, nutrientes, agrotóxicos e práticas de manejo do solo (MACHADO; VETTO-RAZZI, 2003; NEITSCH *et al.*, 2005).

Trata-se de um modelo interdisciplinar robusto, de base física, contínuo no tempo, com pa-

râmetros distribuídos em escala de bacia hidrográfica, e que possibilita o uso de interface com SIG como ferramenta de suporte para a entrada de dados topográficos, pedológicos e de cobertura do solo, a fim de representar a variabilidade espacial das características de uma determinada bacia hidrográfica. Afora isso, o SIG também torna mais prático o processo de construção dos cenários de simulação, sobretudo pelo seu sistema de organização dos dados e visualização georreferenciada.

Para representar a heterogeneidade de uma bacia hidrográfica, o SWAT faz uso de um esquema de divisão da mesma em subunidades com uma abordagem de duas etapas. Primeiro, baseando-se na topografia e na delimitação da área, informadas a partir de um Modelo Digital de Terreno (MDT), e na conformação da rede hídrica, a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias. Em seguida, cada sub-bacia é dividida em unidades de resposta hidrológica (*hydrologic response units*, HRUs), que representam uma combinação única de tipo, uso e ocupação do solo; uma pequena região homogênea a partir da qual serão calculados elementos do modelo com maior precisão, a exemplo de escoamento superficial e produção de sedimentos (BOURAQUI et al., 2005).

Para avaliar a produção de sedimentos, o SWAT faz uso de uma adaptação da Equação Universal de Perdas de Solo (USLE), sendo que a vazão de pico é dada por uma modificação do Método Racional. O escoamento superficial é obtido através do método Número-curva do *Soil Conservation Service* ou através do *Green & Ampt Infiltration Method* (NEITSCH et al, 2005). Esse conjunto de equações constitui uma metodologia relativamente simples de ser manejada, mas carrega em si uma limitação importante, uma vez que contempla apenas a erosão do tipo laminar, negligenciando erosões mais intensas como é o caso da erosão linear e das voçorocas. A equação 1 mostra que a produção de sedimentos de determinado dia em toneladas métricas é dada por:

$$Sed = 11,8(Q_s \cdot q_p \cdot \text{area}_{hru})^{0,56} \cdot (k_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG) \quad (1)$$

Sendo Q_s volume de água do escoamento superficial (mm H₂O/ha), q_p a vazão de pico (m³/s), área a área da unidade de resposta hidrológica em questão, K_{USLE} o fator de erodibilidade, o mesmo da USLE, C_{USLE} o fator de cobertura do solo, P_{USLE} o fator de práticas conservacionistas, LS_{USLE} o fator topográfico e

$CFRG$ o fator de correção pela porcentagem de rochas, sendo obtido pela equação 2.

$$CFRG = e^{(-0,053 \cdot rocha)} \quad (2)$$

Sendo que $rocha$ é a porcentagem (%) de rocha presente na primeira camada do solo.

Para este trabalho a porcentagem de rocha dos solos foi desconsiderada por conta da escassez de dados e da imprecisão dos mesmos.

As rotinas de modelagem sedimentológica que simulam o transporte de sedimento através da rede de canais consistem em dois componentes, operando simultaneamente: deposição e degradação (SETEGN et al., 2009). A deposição dentro do canal e nas margens aluviais de cada sub-bacia até o exutório da bacia é baseada na velocidade de deposição das partículas do sedimento. Essa velocidade de sedimentação é determinada pela Lei de Stokes, que é uma função do diâmetro ao quadrado da partícula. A profundidade de queda através do fluxo do rio é o produto da velocidade de sedimentação e o tempo de percurso da água. A taxa de transporte é estimada para cada tamanho de partícula como uma função linear da velocidade de queda, do tempo de percurso e da profundidade do fluxo. A degradação do sedimento no canal é fundamentada no conceito do poder de fluxo de Bagnold (1977).

DADOS DE ENTRADA PARA O SWAT

O ambiente SWAT tem início com o delineamento automático da bacia hidrográfica a partir de um MDT e da definição do ponto de exutório da bacia. Para tanto, O MDT usado neste trabalho, contemplando a região de estudo, com resolução de 30m, foi obtido a partir do projeto do TOPODATA, banco de dados geomorfométricos do Brasil, vinculado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) por meio de seu portal da internet (INPE, 2010). Para o exutório da bacia, deve-se buscar o ponto limite entre a dinâmica fluvial e a influência estuarina, tendo em vista que o modelo SWAT não é capaz de representar sistemas com interferências de maré.

Afora o MDT, também compuseram a base de dados de entrada vetoriais o mapa de tipos de solo e o mapa de cobertura do solo.

O primeiro foi elaborado durante o Plano Estadual de Recursos Hídricos (SERHID, 1998) e disponibilizado pelo IDEMA (2010). Dentre os pa-

parâmetros físicos dos solos necessários para execução do modelo, a profundidade das camadas (SOL_Z), a porcentagem de carbono orgânico (SOL_CB) e a granulometria (CLAY, SILT e SAND), foram retirados de perfis de solo disponibilizados por Jacomine (1971) através do Levantamento exploratório-reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Norte, assim como pelos perfis disponibilizados pelo Projeto Radambrasil (BRASIL, 1981). A erodibilidade (USLE_K) foi calculada para cada camada de solo através da equação de erodibilidade de Williams (1995). Já os dados físico-hídricos do solo, tais como porosidade (ANION_EXCL), condutividade hidráulica (SOL_K), capacidade de água no solo (SOL_AWC), além de albedo (SOL_ALB) e densidade aparente (SOL_BD), por conta da carência dessas informações especificamente para os solos da BHRP, foram transcritos de Baldissara (2005), que trata de solos semelhantes, mas de outra região.

Vale salientar, contudo, que essas aproximações podem comprometer a acurácia dos resultados definidos pelo SWAT. Nesse sentido, Romanowicz et al. (2005), avaliando a sensibilidade do modelo SWAT para a parametrização dos dados de solo e cobertura do solo, concluiu que as respostas hidrológicas do modelo perante as propriedades dos solos calculadas são substanciais, de maneira que é preferível que as propriedades hidrológicas dos solos sejam calculadas diretamente e especificamente para a área de estudo, em vez de desenvolver aproximações a partir de perfis ou assumir valores de outras áreas.

O mapa de cobertura de solo foi elaborado a partir da classificação por *Máxima Verossimilhança* aplicada a duas imagens captadas pelo satélite LANDSAT-7, através do sensor EMT, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Uma das imagens contempla a metade oriental da bacia Potengi e corresponde à órbita/ponto 214/064 datada de 04/08/2001. Já para a metade ocidental da bacia, fez-se uso da imagem LANDSAT-7 que corresponde à órbita/ponto 215/064 datada de 11/06/2002. Ambas as imagens foram compostas em RGB 543. Como resultado da classificação, seis classes de cobertura do solo foram definidas, assim como consta na Tabela1.

Para o SWAT, os parâmetros envolvidos na edição de cada tipo cobertura do solo estão intimamente relacionados com as características da vegetação associada, salvo as áreas urbanizadas, e a seção reservada para sua edição é denominada *Land Cover/Plant growth*. Esses mesmos parâmetros são suficientemente complexos ao ponto que suas estimativas específicas se tornem proibitivas para este tra-

lho. Assim, os tipos de cobertura foram associados às categorias presentes, por default, no banco de dados no modelo SWAT, com base em suas semelhanças conceituais e estruturais, sobretudo na forma como impõem proteção ao solo.

Tabela1 - Cobertura do solo da bacia hidrográfica do Rio Potengi (BHRP).

TIPOS DE COBERTURA	Área (%)
Agricultura, pastagem e vegetação em regeneração	17,0
Solo exposto	4,5
Estruturas urbanas	3,0
Vegetação densa	28,0
Vegetação pouco densa	45,0
Corpos hídricos	2,5

Reconhece-se, porém, que o ideal seria construir uma base de dados própria com os parâmetros estimados diretamente para os tipos de cobertura presentes na bacia Potengi, o que requer considerável investimento de recursos.

No que diz respeito aos processos climáticos, a aplicação do modelo SWAT requer, como dados de entrada, valores diários de precipitação; temperatura máxima e mínima; radiação solar; umidade relativa; e velocidade dos ventos. Todavia, o SWAT permite que ao informar dados de chuva e temperatura, os valores dos outros fatores sejam simulados através do programa *gerador climático WXGEN* (NIELTSCH et al., 2005; GEZA; McCRAY, 2008).

De acordo com Schuol et al. (2008), o WXGEN é capaz de preencher as falhas em dados e de ampliar a série temporal de dados diários com base em estatísticas mensais. Contudo, essa estatística mensal é alicerçada em longas séries de dados diários, de maneira que pode se tornar inútil em casos de inexistência de dados diários, ou quando os dados são oriundos de estações muito distantes de uma determinada sub-bacia. O arquivo do gerador climático (.wgn), acionado nos casos em que há falta de registros diários medidos, deve conter os dados estatísticos necessários para gerar dados climáticos diários representativos para cada sub-bacia.

A habilidade do SWAT em reproduzir as vazões está fortemente relacionada com a presença e qualidade dos dados de precipitação informados. Nesse sentido, deve-se nutrir o modelo com dados pluviométricos de estações meteorológicas próximas ou inseridas na bacia hidrográfica, sendo que no

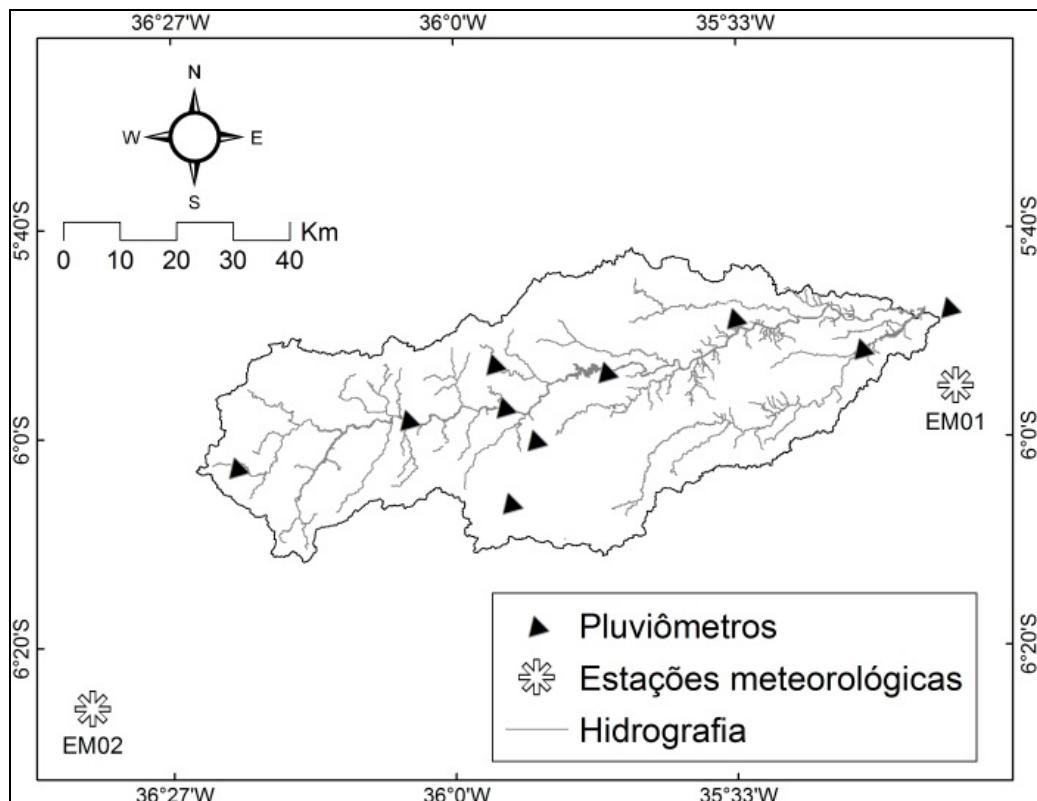


Figura 4 - Localização das estações pluviométricas e meteorológicas utilizadas para execução do modelo SWAT.

caso de múltiplas estações, o modelo gerará um mapa poligonal de Thiessen e um arquivo de precipitação distribuída.

Neste trabalho, a Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte, EMPARN, forneceu registros pluviométricos diários de 10 estações contendo séries históricas com 45 anos (1963-2007). Para obter a Evapotranspiração Potencial a partir do método Penman-Monteith e para compor a estatística do gerador climático do SWAT é necessário obter dados de temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos, que foram obtidos de duas estações meteorológicas (Figura4):

- **EM01:** Estação Meteorológica Convencional da UFRN, localizada em Natal e com coordenadas 5°55'S e 35°12'W, da qual foram obtidos doze anos de registros diários (1995-2007) de precipitação, umidade relativa do ar, temperatura do ar, temperatura máxima, temperatura mínima e velocidade do vento.

- **EM02:** Estação Meteorológica Convencional do município de Cruzeta, com coordenadas 6,417°S e 36,783°W, da qual foi possível obter uma série com cinco anos de registros diários (1997-2001) de precipitação, umidade relativa do ar, temperatura do ar, temperatura máxima, temperatura mínima e velocidade do vento (INPE, 2011).

Tão logo a bacia tenha sido subdividida em sub-bacias e em HRUs, os parâmetros hidrológicos tenham sido determinados e os arquivos de dados climáticos tenham sido criados, o modelo pode ser executado dentro de um determinado período de simulação. Para este trabalho, o referido período foi selecionado de tal forma que se tivesse a maior disponibilidade de dados contínuos possível, a fim de evitar distorções nos resultados.

Com base nisso, o fator limitante para a seleção do período de simulação foi o intervalo de dados climáticos obtidos para a estação meteorológica de Cruzeta, através da Plataforma de Coleta de Dados do INPE, com disponibilidade contínua em apenas cinco anos, de 1997 a 2001.

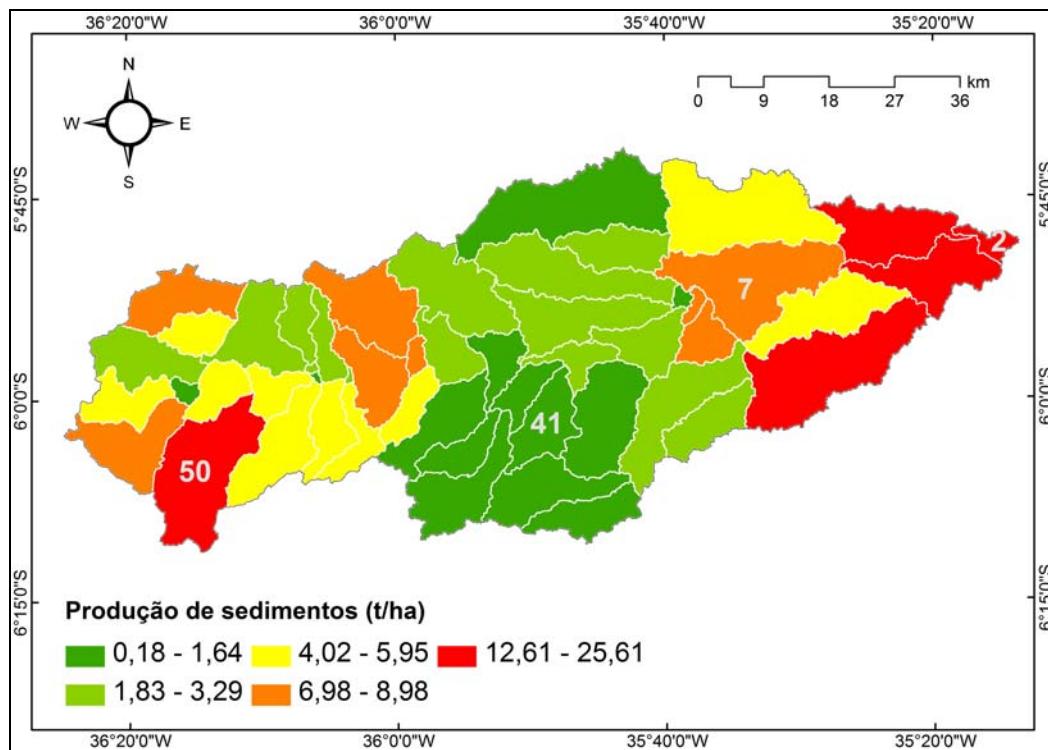


Figura 5 - Distribuição da produção de sedimentos ao longo da bacia hidrográfica do Rio Potengi (BHRP) ao final do período de simulação.

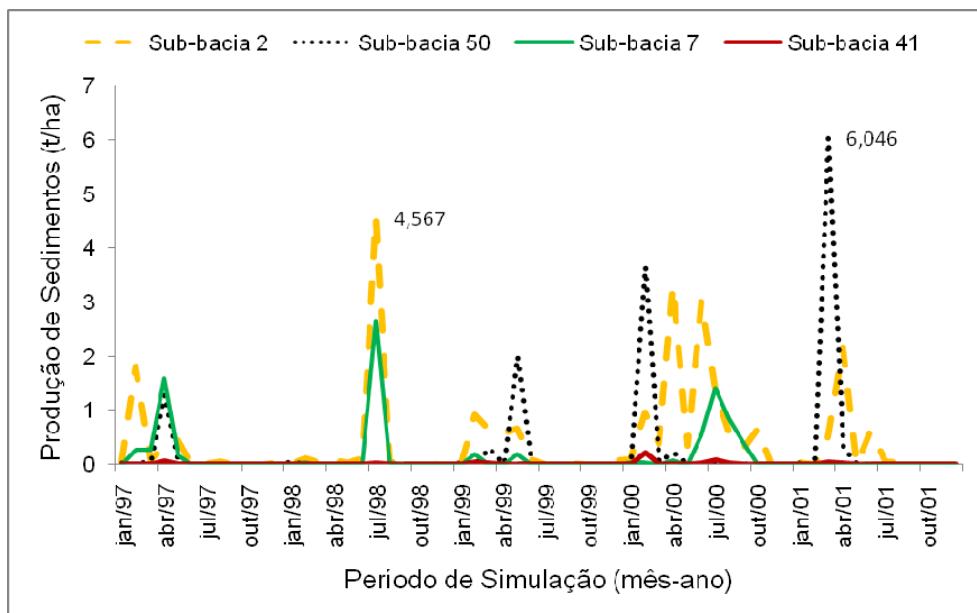


Figura 6 - Comparação entre sedimentos produzidos nas sub-bacias 50, 41, 7 e 2 ao longo do período de simulação.

RESULTADOS E DISCUSÃO

A partir da delimitação da BHRP, o SWAT, através de sua interface com SIG, definiu 51 sub-bacias. Com o intuito de avaliar os resultados das simulações em porções da BHRP ambientalmente distintas entre si, quatro *sub-bacias de referência* foram selecionadas dentre as 51 geradas, sendo elas as de número 50, 41, 7 e 2 (Figura 5). Isso feito com base no pressuposto que por estarem em regiões com diferentes composições de paisagem e de cobertura do solo, por pertencerem a diferentes zonas climáticas, e por representarem diferentes predominâncias de suscetibilidade à erosão hídrica, devem retornar valores substancialmente diferentes de escoamento superficial e de produção de sedimento como resultado das simulações com o SWAT.

A Figura 5 ilustra a soma da produção de sedimentos associada a cada sub-bacia ao final do período de simulação, organizadas em cinco classes, que foram definidas a partir do método *Natural Breaks* (JENKS, 1977), o qual se baseia em agrupamentos inerentes à faixa de dados. As classes são definidas a partir da identificação de aglomerados de valores similares, maximizando a diferença entre as classes; as fronteiras das classes são traçadas onde há relativamente grandes diferenças entre os valores.

Nessa figura é possível notar que houve maior produção de sedimentos nas porções mais ao leste e no extremo oeste da bacia, atingindo valores de 5,12 t/ha.ano na sub-bacia 2 e 2,81 t/ha.ano na sub-bacia 50.

Por outro lado, o centro da bacia hidrográfica é responsável por uma contribuição consideravelmente menor nesse sentido, com produção média de 1,80 t/ha.ano na sub-bacia 7 e 0,12 t/ha.ano na sub-bacia 41.

A avaliação da produção de sedimentos de forma comparativa entre as 4 sub-bacias de referência indicou que a sub-bacia 50, localizada na porção mais ocidental e serrana da bacia, é, das quatro, a que responde com maiores picos de produção mensal de sedimentos, alcançando a marca de 6,046 t/ha, estando os picos concentrados entre fevereiro e maio (vide Figura 6).

Já a sub-bacia 41 é a menos expressiva no que concerne à produção de sedimentos, com maior pico ocorrendo em fevereiro de 2000, apenas 0,224 t/ha. Provavelmente, neste caso, o fato de se tratar de uma região com pouca declividade, com influência da zona climática semiárida rigorosa, com pouco escoamento superficial (Tabela 2) e com alguma

proteção por cobertura vegetal, mesmo que pouco densa, tenha sido fundamental para esse resultado.

A sub-bacia 7, ao leste, sob influência da zona climática sub-úmida, região que mais sofre influência de atividades antrópicas, apresenta uma produção de sedimentos intermediária, chegando a produzir, aproximadamente, 2,60 t/ha, com picos concentrados entre abril e julho.

Deve-se destacar ainda a sub-bacia 2 por ser a porção mais oriental da bacia hidrográfica, permitindo acesso ao estuário, assim como por ter parte de seu território ocupado por áreas urbanizadas, majoritariamente pelo município de Natal, capital do Estado. Nessa sub-bacia, o maior produção de sedimentos ocorreu em julho, alcançando 4,567 t/ha. Percebe-se também que apesar de apresentar menor pico que a sub-bacia 50, a sub-bacia 2 apresenta maior média anual de produção de sedimentos: 5,12 t/ha.ano contra 2,81 t/ha.ano na sub-bacia 50 (Tabela 2).

Tabela 2 - Comparação da média anual de escoamento superficial e produção de sedimentos nas sub-bacias de referência.

Sub-bacias	Escoamento (mm/ano)	Prod. de sedimentos (t/ha.ano)
2	423,48	5,12
7	59,14	1,79
41	7,08	0,12
50	24,87	2,81

A partir dos resultados obtidos pelo SWAT na calha dos rios foi possível avaliar, de forma preliminar, a propagação de sedimentos ao longo dos trechos dos rios e na BHRP. Isso é feito por meio da relação entre os parâmetros *SED_OUT* e *SED_IN* (Eq. 3). Essa relação descreve a *fração de sedimento* (F_s) que cada trecho de rio transporta para o trecho subsequente com base na carga de sedimentos de entrada (*SED_IN*).

$$F_s = SED_{OUT}/SED_{IN} \quad (3)$$

Nesse sentido, pode-se observar na Figura 7 que nos trechos de rios pertencentes às sub-bacias da cabeceira oeste, que oferecem maiores declividades, ocorre pouca ou praticamente nenhuma deposição. Por outro lado, por conta das alterações ríspidas de conformação altimétrica que se manifestam na transição entre o Planalto da Borborema e a Depressão Sertaneja, a região posicionada imediatamente

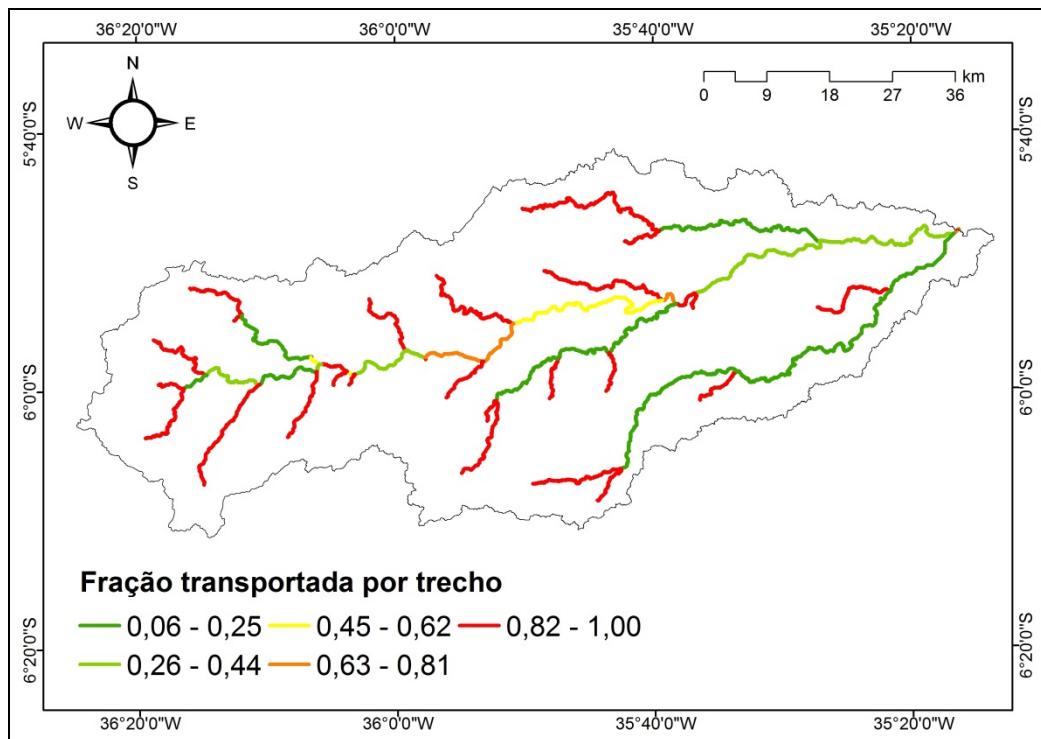


Figura 7 - Fração de sedimento que transpassa cada trecho de rio dentro da rede hídrica da bacia ao final do período de simulação.

mente após as sub-bacias de cabeceira é entrecortada por trechos de rio nos quais prevalece a deposição de sedimentos. É possível afirmar que a deposição de sedimentos é promovida, principalmente, pela redução brusca das declividades, uma vez que essa configuração é capaz de promover diminuição da competência ou capacidade fluvial. Versa-se, portanto, de acordo com Christofolletti (1980), sobre uma região de depósitos do tipo cone de deposição.

Como exemplo, o trecho de rio que atravessa a sub-bacia 50, transporta praticamente todo sedimento para o trecho seguinte, pertencente à sub-bacia 34, com declividades consideravelmente menos acentuadas, que por sua vez transporta apenas 8% do sedimento que recebe.

Para essa mesma região, os resultados das simulações com o SWAT exibiram as menores taxas de produção de sedimentos, fato justificado pelo terreno com menores declividades, pela menor agressividade climática e pela menor presença de atividades antrópicas em comparação com a região mais ao leste ou de Tabuleiros Costeiros.

Além disso, soma-se à questão a grande variação espacial das precipitações e alto nível de intermitência dos cursos hídricos, aspectos típicos do

semi-árido, o que contribui para pensar a região central da bacia como um grande obstáculo à propagação de sedimentos oriundos do extremo oeste para o estuário do rio, no extremo leste.

Percebe-se, ainda, que à medida que a rede hídrica avança para o litoral, as frações de sedimento (FS) para cada trecho de rio, em geral, diminuem, coincidindo com aplainamento das feições geomorfológicas da região. Considerando que é na porção leste onde se manifestam, destacadamente, o maior grau de interferência antrópica na cobertura do solo, isso pode ser atribuído à combinação de maiores taxas de produção de sedimentos com menores declividades de terreno, o que propicia a deposição de sedimentos.

Considerando que, como apresentado em Santos e Scudelari (2011), a região leste da bacia, onde se revelam os Tabuleiros Costeiros, é naturalmente pouco suscetível à erosão hídrica, não sendo a sua natureza a responsável pelo significativo aporte de sedimentos para o leito do rio e seu estuário, os resultados sugerem que o acentuado montante de sedimentos produzidos é consequência predominante das atividades antrópicas que se desenvolvem na região.

Isto posto, nesse contexto, foi possível constatar que nas regiões de cabeceira oeste da bacia, onde se revelam o Planalto da Borborema e as nascentes da rede hídrica, a produção de sedimentos é impulsionada pelas grandes declividades aliadas aos solos frágeis. Trata-se de uma região com significativo potencial natural para sofrer erosão hídrica, mas que é amortecido pela cobertura vegetal, mesmo que pouco densa, como em geral é a Caatinga. Entende-se, porém, que caso a supressão da Caatinga avance também nessas áreas, a erosão pode ser potencializada e as taxas de produção de sedimentos serão seriamente incrementadas, o que justifica a aplicação de investimentos com fins de preservação dessa porção da BHRP.

Expõe-se isso tendo em vista que, de um modo geral, constataram-se carência e obsolescência de dados que representassem apropriadamente a dinâmica da bacia hidrográfica para fins de modelagem hídrica, mormente no que diz respeito a seus aspectos pedológicos, climáticos e de cobertura do solo.

Quanto à base de dados que caracterizam os solos da bacia Potengi a execução do modelo neste trabalho só foi possível graças ao uso de dados抗igos e de baixa resolução, a aproximações indesejáveis, e a associações com solos de outras regiões, o que pode ter prejudicado substancialmente a precisão quantitativa dos resultados. Nesse contexto, a deficiência na qualidade dos dados de solo já foi apontada por Baldissara (2005) e Romanowicz *et al.* (2005) como um empecilho para a precisão dos resultados retornados pelas simulações com o SWAT.

Dessa forma, um esforço para melhor identificação e caracterização dos solos da BHRP deve beneficiar a qualidade de diversos tipos de pesquisas de modelagem, contribuir para o conhecimento das peculiaridades da região e para o desenvolvimento de planos de manejo da bacia.

Já para a caracterização climática da bacia apenas foram disponibilizados dados de duas estações meteorológicas com fins de cobrir uma área considerada grande, ~4.100 Km². Portanto, seria de grande valia o desenvolvimento de um trabalho que reunisse todos os dados existentes para regionalização, ou mesmo que houvesse maior empenho na construção de registros históricos.

Cabe destacar ainda a necessidade de refinamento do mapa de cobertura do solo, desenvolvido neste trabalho, considerando aquisição de novas imagens e campanhas de campo para calibrar a classificação das unidades de paisagem. Além disso, é interessante que a evolução da ocupação seja a-

companhada a partir de atualizações periódicas desse mapa.

Somando-se aos problemas associados aos dados de entrada do modelo, uma das principais deficiências associadas ao desenvolvimento deste trabalho reside na não execução do processo de calibração e validação do modelo diante de registros reais observados em campo. Para a simulação da produção de sedimentos, essa etapa é impossibilitada pela carência de registros históricos sistematizados.

CONCLUSÕES

Apesar da simplicidade da maioria das equações que compõem o modelo SWAT, ainda podem prejudicar sobremaneira sua capacidade de representar a realidade, bem como de servir como ferramenta eficiente para qualquer atividade de diagnóstico ou de planejamento de bacias hidrográficas.

Neste trabalho, a partir dos resultados obtidos com a aplicação do modelo SWAT foi possível, em caráter qualitativo, identificar regiões que provavelmente contribuem destacadamente para a produção de sedimentos (Figura 5) na BHRP, preservando semelhança com o mapa de suscetibilidade à erosão hídrica (Figura 3).

No fim, a execução do SWAT, acabou possibilitando, ainda assim, um melhor entendimento das causas locais de produção de sedimentos, bem como o seu comportamento e sua distribuição nas diferentes regiões da BHRP.

Também foi possível avaliar a aplicabilidade do modelo a uma região com indisponibilidade e inadequação de dados, questões recorrentes no nordeste brasileiro, e que podem prejudicar sobremaneira sua capacidade de representar a realidade, bem como de servir como ferramenta eficiente para qualquer atividade de diagnóstico ou de planejamento de bacias hidrográficas. Apesar das deficiências encontradas o modelo mostrou-se bastante capaz de representar qualitativamente os padrões de propagação de sedimentos na BHRP.

Especificamente, a avaliação dos padrões de propagação dos sedimentos através dos cursos do rio indicou que a região de transição entre o Planalto da Borborema e a Depressão Sertaneja, seguindo em direção à região central da bacia, trata-se de uma área de deposição de sedimentos, com conformação que a classifica como um *cone de dejeção*. Para essa mesma região, os resultados das simulações com o

SWAT exibiram as menores taxas de produção de sedimentos, fato justificado pelo terreno com menores declividades, pela menor agressividade climática e pela menor presença de atividades antrópicas em comparação com a região mais ao leste ou de Tabuleiros Costeiros. Diante disso, é possível concluir que a configuração físico-ambiental da região central da BHRP indica que muito dificilmente um evento de chuva que ocorre na cabeceira oeste da bacia acabará contribuindo significativamente com aporte de sedimento para o estuário do rio.

É preciso ressaltar que, apesar da contribuição dada pela avaliação qualitativa, esses resultados, definitivamente, não podem ser adotados como conclusivos quantitativamente, assim como não devem ser empregados para fins práticos, tendo em vista que a etapa de calibração e validação ainda não foi desempenhada e, portanto, as magnitudes dos valores apresentados podem estar substancialmente distorcidas.

No entanto, devido ao seu grande potencial, o uso dessa ferramenta não deve ser descartado para a gestão de Bacias que lançam seus sedimentos em estuários ou Bacias que abrigam portos, como o caso da BHRP.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, pelo apoio financeiro concedido através do projeto CNPq 564750/2008-5.

REFERÊNCIAS

ARABI, M.; GOVINDARAJU, R. S.; HANTUSH, M. M. A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practices. *Journal of Hydrology*, v. 333, p. 459-471, 2007.

ARABI, M.; GOVINDARAJU, R. S.; HANTUSH, M. M. (US-EPA). *Watershed management tool for selection and spatial allocation of nonpoint source pollution control practices: final report*. Environmental Protection Agency – United Estates, 2007b.

ARNOLD J. G.; ALLEN, P. M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *Journal of Hydrology*, v. 176, p. 57-77, 1996.

Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *J. American Water Resour. Assoc.* v. 34, n.1, p. 73-89, 1998.

BAGNOLD, R.A. Bed load transport by natural rivers. *Water Resources Research*, v 13, p. 303-312, 1977.

BALDISSERA, G. C. *Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT*. 2005. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Mato Grosso (UFMG), 2005.

BOURAOUI, F.; BENABDALLAH, S.; JRAD, A.; BIDOGLIO, G. Application of the SWAT model on the Medjerda river basin (Tunisia). *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 30, p. 497-507, 2005.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria-Geral Projeto Radambrasil. *Folhas SB 24/25 Jaguari-be/Natal: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro: MME/Secretaria-Geral, 1981.

CHEN, E.; MACKAY, D. S. Effects of distribution-based parameter aggregation on a spatially distributed agricultural nonpoint source pollution model. *Journal of Hydrology*, v. 295, p. 211-224, 2004.

CHRISTOFOLLETTI, A. *Geomorfologia*. 2^a ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

DYER, K. R. *Estuaries: a physical introduction*. 2 ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1997. 195 p.

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

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. *The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions*. Working Paper 07-WP 443, Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University, 2007.

GEZA, M.; MCCRAY, J. E. Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. *Journal of Environmental Management*, v. 88, p. 393-406, 2008.

IBGE. *Rio Grande do Norte: Estimativa da população 2009.* Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 04 out. 2010.

IDEEMA. *Sigga Web.* Disponível em: <<http://200.149.240.140:8080/i3geo/>>. Acesso em: 18 out. 2010.

IM, S.; BRANNAN, K.; MOSTAGHIMI, S.; CHO, J. A comparison of SWAT and HSPF models for simulating hydrologic and water quality responses from an urbanizing watershed. *ASAE Paper No. 032175*, 2003.

INPE. *Plataforma de Coleta de Dados.* Disponível em: <<http://bancodedados.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 07 mar. 2011.

INPE. *TOPODATA: Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil.* Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 14 out. 2010.

JACOMINE, P. K. T. Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do estado do Rio Grande do Norte. Recife: MA/DNPEA, 1971.

JENKS, G. F. 1977. Optimal data classification for choropleth maps. *Occasional Paper no. 2*. Lawrence: Department of Geography, University of Kansas.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP). *R. Bras. Ci. Solo*, v. 27, p. 735-741, 2003.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. *Soil and water assessment tool: theoretical documentation*. Texas: Soil And Water Research Laboratory & Blackland Research Center, 2005.

PRADO, T. B. G. *Evolução do uso das terras e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Jundiaí-Mirim.* 2005. Dissertação (Mestrado), 2005.

ROMANOWICZ, A. A.; VANCLOOSTER, M.; ROUNSEVELL, M.; LA JUNESSE, I. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium. *Ecological Modelling*, v. 187, p.27-39, 2005.

SAATY, T. L. Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy/network processes. *European Journal of Operational Research*, v. 168, p. 557-570, 2006.

SANTOS, R. D.; SCUDELARI, A. C.; Avaliação da Suscetibilidade à erosão hídrica na bacia hidrográfica do rio Potengi, RN; in *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, Maceió, AL, pp 1-20, 2011

SCHUOL, J.; ABBASPOUR, K. C.; SRINIVASAN, R., YANG, H. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using SWAT hydrologic model. *Journal of Hydrology*, v. 352, p. 30-49, 2008.

SERHID (SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS). *Plano Estadual de Recursos Hídricos: Relatório diagnóstico dos dados e informações disponíveis*. Rio Grande do Norte, 1998.

SETEGN, S. G.; SRINIVASAN, R.; DARGAHI, B.; MELESSE, A. M. Sapatial delineation of soil erosion vulnerability in the Lake Taba Basin, Ethiopia. *Hydrol. Process.*, 2009.

WILLIAMS, J. R. The EPIC model. p. 909-1000. In SINGH, V. P. (ed.). *Computer models of watershed hydrology*. *Water Resources Publications*, 1995.

Evaluation Of Sediment Yield And Its Contribution To The Potengi River, RN

ABSTRACT

This study aims to assess the applicability of the SWAT model to estimate the sediment yield distribution along the Potengi River watershed, as well as its contribution to the estuary. Furthermore, an assessment of its erosion susceptibility was used for comparison. The SWAT was run using a five-year period (1997-2001). Results were analyzed in terms of surface runoff, sediment yield and their propagation along each river section, so that it was possible to find that the regions in the extreme west of the watershed and in the downstream portions returned higher values of sediment yield, reaching respectively 2.8 e 5.1 ton/ha.year, whereas central areas, which were less susceptible, returned the lowest values, never more than 0.7 ton/ha.year. It was also noticed that in the sub-watersheds that lay further west,

where one can observe the headwaters, sediment yield was naturally forced by high declivity and weak soils. On the other hand, results suggest that the eastern part would not contribute significantly to the sediment inflow into the estuary, and most of the sediment yield there is due to anthropic activities. For the central region, the sediment propagation analysis of sediment propagation indicates deposition predominantly in opposition to transport. Thus, it is not expected that isolated rain storms occurring in the upstream river portions would significantly provide the estuary with sediment.

Keywords: erosion susceptibility; sediment yield, SWAT, Potengi River.