



## ESTIMATIVA DA VARIABILIDADE INTERANUAL DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS USANDO SIG: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO AÇUDE ACARAPE DO MEIO

*George Leite Mamede<sup>1</sup>, Débora Carla Barboza de Sousa<sup>2</sup>, Jairo Lima do Nascimento<sup>3,4</sup>*

**RESUMO** – O presente estudo tem como objetivo analisar a variabilidade interanual da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio e estimar o assoreamento no mesmo açude, utilizando ferramentas do Sistema de Informação Geográfica – SIG. A bacia estudada possui uma área de cerca de 208 km<sup>2</sup> e está localizada na região do semiárido brasileiro, no Estado do Ceará. Para estimar a produção de sedimentos na bacia, no período de 1985 a 2013, aplica-se a Equação Universal de Perda de Solos (USLE), com os fatores espacializados usando SIG, associada ao método de transporte difuso de sedimentos (SDR). Para determinação da variação temporal do uso do solo na bacia, seis imagens de satélite da estação chuvosa ao longo do período de simulação são processadas e classificadas usando o método ISODATA. Os resultados indicam uma produção de sedimentos média na bacia de 21,9 ton/ha/ano para o período estudado, com redução de aproximadamente 11,3% do volume do açude Acarape do Meio. O fator de uso do solo (Fator C) dita o padrão temporal de produção de sedimentos do período analisado, embora a dinâmica do sedimento esteja diretamente relacionada com a variabilidade pluviométrica. A produção de sedimento é bem intensificada nos primeiros anos da década de 90 em virtude dos incentivos para ampliação da produção agrícola na região. A partir de 1997, há uma tendência de desaceleração da produção agrícola e consequente recomposição da vegetação, o que resulta em uma atenuação da produção de sedimentos.

**ABSTRACT** – The present study aims to analyse the annual variability of sediment yield at the Acarape do Meio catchment and to estimate siltation at the outlet reservoir using Geographic Information System - SIG. The studied catchment has an area of 208 km<sup>2</sup> and is located in the Brazilian Semiarid region, in the State of Ceara. To estimate sediment yield at the Acarape do Meio catchment in the period catchment, the USLE equation, with its factors spatialized using SIG, combined with the sediment delivery ratio (SDR) is applied. For the assessment of the temporal variability of soil use in the catchment, six satellite imageries of wet years within the time period are processed and classified using the ISODATA method. The results indicate a mean sediment yield in the catchment of about 21.9 ton/ha/year for the simulation period, with a reduction of 11.3% of the water storage capacity at the Acarape do Meio reservoir. The soil use factor (Factor C) explains the long-term temporal patterns of sediment yield in the catchment, although the sediment dynamic is strongly related to precipitation variability. Sediment yield is higher at the first years of the 90s, due to the increase of agricultural use. After 1997, a trend of reduction in agricultural use and natural vegetation recovery is observed, which results on an attenuation of sediment yield.

---

1) Professor Adjunto da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável - IEDS. E-mail: [mamede@unilab.edu.br](mailto:mamede@unilab.edu.br)

2) Mestre em Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal do Ceará – UFC. E-mail: [deborabarboza9@gmail.com](mailto:deborabarboza9@gmail.com)

3) Graduando em Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável - IEDS. E-mail: [jlnascimento94@gmail.com](mailto:jlnascimento94@gmail.com)

---

## **INTRODUÇÃO**

O estudo dos processos referentes à erosão e transporte de sedimento é de extrema importância em regiões como o semiárido brasileiro, onde a disponibilidade hídrica é dependente em sua maior parte de reservatórios superficiais (Mamede et al. 2012). Esses reservatórios são fortemente impactados por processos erosivos na bacia e consequente assoreamento destes mananciais (Trush et al. 2000; Lima Neto et al. 2011).

Vários estudos vem sendo realizados para quantificar a dinâmica dos processos erosivos em bacias hidrográficas como resultado de modificações do uso do solo (Chen & Mackay, 2004; Kavvas et al., 2004; Verstraeten and Prosser, 2008; Müller et al., 2010; Yang & Lu, 2014; Kusimi et al., 2014). Grande parte destes estudos tomam como base a Equação Universal da Perda de Solos (USLE – Universal Soil Loss Equation), desenvolvida a partir de 10000 lotes experimentais por Wischmeier & Smith (1978) devido a sua simplicidade e aceitação na comunidade científica

Em ambientes com baixa disponibilidade de dados como observado no semiárido brasileiro, a aplicação de modelos mais complexos de estimativa de produção de sedimentos em bacias hidrográficas é restrita. Neste estudo, optou-se pela utilização do modelo HIDROSED associado a ferramentas de SIG – Sistemas de Informações Geográficas (Araújo et al., 2003; Lira et al., 2014), uma modelagem mais simples no que diz respeito a parametrização, mas que permite a análise da dinâmica espaço-temporal da produção de sedimento em bacias hidrográficas de regiões semiáridas.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **Caracterização da área**

A bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio está incluída nas bacias metropolitanas, e fica localizada em uma região serrana compreendida pelos municípios de Pacoti, Palmácia e Redenção, no Centro-Norte do Estado do Ceará, ocupando uma área de 208,2 km<sup>2</sup> com bacia hidráulica de 220 ha. (Figura 1) e altitudes variando de 200 a 1100 m.

O reservatório principal, que dá nome à bacia, encontra-se na zona rural do município de Redenção. A barragem do açude está situada, em coordenadas geográficas, a 4° 11' S e 38° 48' W (UTM – 522127E e 9536425, zona 24M), e é responsável por barrar o rio Pacoti, principal rio da bacia hidrográfica, com a finalidade de abastecimento urbano de cidades e indústrias a jusante do reservatório. A capacidade original do açude era de 34,1 hm<sup>3</sup> na cota 131,3 m. Foram realizados levantamentos batimétricos no reservatório Acarape do Meio nos anos de 1997 e 2011, indicando capacidades de, respectivamente, 31,43 hm<sup>3</sup> e 29,67 hm<sup>3</sup>.

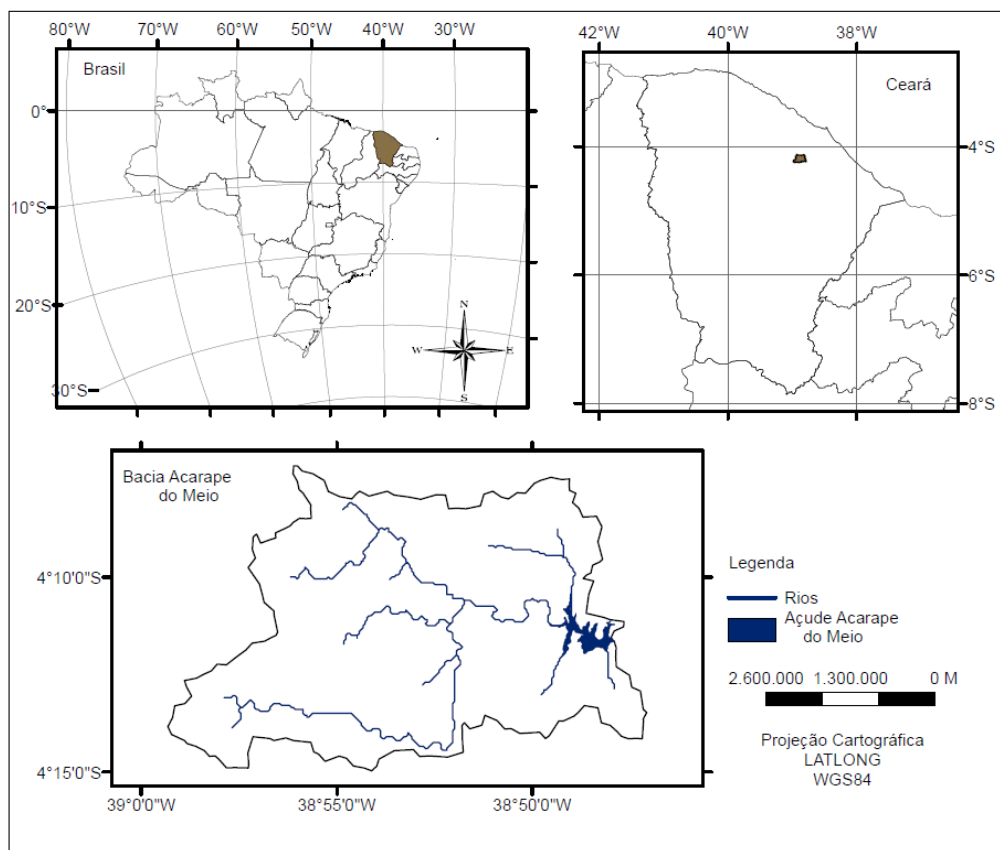


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio.

### Estimativa da produção de sedimento

A erosão localizada da bacia é estimada com o auxílio de ferramentas de SIG através de mapas com espacialização dos fatores da Equação Universal de Perdas do Solo (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978), como segue:

$$M_L = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

em que,  $M_L$  é a perda média anual de solos na bacia por unidade de área, em  $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ ;  $R$  é a erosividade da chuva ( $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $K$  é a erodibilidade dos solos ( $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $LS$  representa o fator topográfico (declividade e comprimento de rampa) (adimensional);  $C$  e  $P$  expressam o uso e manejo da terra e a adoção de práticas conservacionistas (adimensionais).

O fator de erosividade da chuva ( $R$ ) é determinado de acordo com Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), conforme apresentado na Equação 2, utilizando os dados de nove postos pluviométricos localizados no interior e nos arredores da bacia hidrográfica estudada.

$$R_i = \sum_{m=1}^{12} 67,355 \cdot \left(\frac{P_m}{P_a}\right)^{0,85} \quad (2)$$

em que:  $P_m$  é a precipitação mensal ( $\text{mm.mês}^{-1}$ );  $P_a$  é a precipitação média anual ( $\text{mm.ano}^{-1}$ ); e  $R_i$  é a erosividade anual no posto ( $\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ). A Tabela 1 apresenta os postos pluviométricos utilizados, assim como as coordenadas em UTM, baseadas no datum WGS 84, e as precipitações médias anuais. As falhas nas séries de pluviometrias são corrigidas utilizando dados do posto mais próximo. A erosividade média na bacia é calculada para cada ano do período analisado (1985-2013), utilizando a ponderação pelo inverso da distância, considerando o centroide da bacia como referência.

Tabela 1 – Postos pluviométricos utilizados na determinação da erosividade da chuva

Posto	Município	Coord. X	Coord Y	Precipitação média anual (mm)
Guaramiranga	Guaramiranga	507397,91	9528396,07	1629
Pacoti	Pacoti	509247,98	9533922,70	1480
Palmácia	Palmácia	518497,55	9541290,32	1348
Sítio Bica	Palmácia	516647,79	9541290,69	1311
Redenção	Redenção	520346,02	9535763,08	1135
Tanques	Maranguape	524048,84	9548658,08	1012
Acarape	Acarape	533292,88	9533916,79	1047
Sítio Livramento	Redenção	531443,26	9533917,48	1079
Mulungu	Mulungu	501849,40	9524711,83	1123

O parâmetro da erodibilidade do solo ( $K$ ) é determinado com base no nomograma de Wischmeyer (Wischmeyer et al, 1971) usando resultados de análises de amostras de solo coletadas em cinco pontos no interior da bacia (Mamede et al., 2007). Esses dados pontuais são espacializados para toda a extensão da bacia por meio de interpolação usando ferramentas de SIG.

O fator topográfico LS foi calculado como uma composição de dois fatores, o comprimento de rampa ( $L_R$ ) e o grau de declive ( $S_R$ ) de acordo com a Equação 3, proposta por Bertoni e Lombardi Neto (1999):

$$LS = 0,00984 \cdot L_R^{0,63} \cdot S_R^{1,18} \quad (3)$$

O grau de declive  $S_R$  é calculado com base em dados SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) com resolução de 92 m, enquanto que o comprimento de rampa  $L_R$  é estimado para toda a bacia, de acordo com o equacionamento proposto por Fernandes (2000), como mostra a Equação 4:

$$L_R = \frac{A}{4L_0} \quad (4)$$

em que:  $A$  é a área da bacia, em  $m^2$ ; e  $L_0$  é a soma dos comprimentos de drenagem na bacia, em m. O valor de  $L_0$  para a bacia é obtido por meio de ferramentas de geoprocessamento, somando-se os comprimentos de drenagem e estradas, admitindo que estas atuam conectando o escoamento na bacia. Araújo (2003) sugere um fator de correção no valor de  $L_0$  de 3,5 para bacias consideradas íngremes como uma tentativa de minimizar imprecisões na determinação de comprimentos de drenagem em cartas na escala de 1:100.000. A geração de rede de drenagem usando SIG também apresenta restrições em terrenos muito declivosos, com comprimentos similares aos encontrados em cartas com esta escala.

O parâmetro correspondente à cobertura vegetal e uso do solo (fator  $C$ ) é determinado para as diferentes classes de uso identificadas na bacia na bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio, com base em classificações de imagens de satélite de períodos chuvosos. Os arquivos raster dos sensores Landsat 5, Landsat 8 e IRSP6 são classificados utilizando os algoritmos desenvolvidos usando lógica fuzzy adaptado às particularidades da bacia e o método do ISODATA. O classificador não supervisionado ISODATA é, então, aplicado usando dados coletados em campo de acordo com trabalho realizado por Sousa (2013). Os valores de  $C$  para os anos que não possuíam imagens do período chuvoso são determinados por interpolação. A partir deste procedimento, são determinados os valores do fator  $C$  para cada uma das classes de vegetação e uso do solo, obtidas da classificação, por meio de pesquisas bibliográficas. As classes definidas são: área urbana ( $C=0,002$ ); corpos d'água ( $C=0$ ); cultivos agrícolas ( $C=0,052$ ); vegetação antropizada ( $C=0,153$ ); vegetação arbustiva ( $C=0,01$ ); vegetação nativa ( $C=0,001$ ). Os valores de  $C$  considerados são adaptados de Creutzfeldt (2006) e Mamede (2007).

Para o fator de práticas conservacionistas ( $P$ ) adotou-se um valor unitário, admitindo-se a inexistência de práticas de conservação na extensão da bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio.

Por meio da combinação dos fatores citados, por meio de multiplicação, obtém-se a erosão localizada na bacia. A estimativa da produção de sedimentos na bacia é realizada utilizando-se o conceito de razão de aporte de sedimentos (SDR), utilizando a proposição de Maner, descrita em Araújo (2003). Dessa maneira a produção de sedimentos na bacia é dada pela Equação 5.

$$M_L = E_L \cdot A \cdot SDR \quad (5)$$

### **Assoreamento no reservatório Acarape do Meio**

Para a simulação de assoreamento do reservatório Acarape do Meio, determina-se, inicialmente, sua eficiência de retenção de sedimento por meio do método empírico da curva de Brune (Brune, 1953). De acordo com o método, a eficiência de retenção do reservatório depende da capacidade de afluência ( $C_a$ ), que representa a razão entre a capacidade do reservatório e o volume afluente ao mesmo.

A partir dos dados de erosão realiza-se uma simulação para um período de 29 anos, compreendido de 1985 a 2013, para verificar o assoreamento do reservatório Acarape do Meio. A capacidade do reservatório ( $31,43 \text{ hm}^3$ ) no ano de 1997 é usada como base para os cálculos, valor medido na batimetria realizada nesse ano, cujos dados foram cedidos pela COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará.

Para a conversão do assoreamento em unidades de massa para unidades de volume foi utilizada a massa específica aparente seca do sedimento assoreado encontrada por Araújo (2003) para o reservatório Acarape do Meio, igual a  $1,32 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ , com base em amostragem do material depositado no açude.

### **Caracterização do uso do solo na bacia**

Para analisar o uso e ocupação da bacia do açude Acarape do Meio utilizou-se a metodologia proposta por Sousa (2013). Foram realizadas campanhas com levantamento de 600 pontos distribuídos na bacia, tomados com um tempo de 3 minutos cada para uniformizar os possíveis erros na coleta. Nestas campanhas foi possível verificar que diversos plantios de subsistência de culturas como de coco babaçu e banana foram feitos ao longo das encostas, sem a adoção de técnicas de conservacionistas de cultivo.

A correção geométrica das seis imagens consideradas neste estudo foi com base na adoção de pontos de controle escolhidos manualmente no programa Google Earth, com datum WGS 84. Como os pontos foram distribuídos uniformemente na cena, utilizou-se como interpolador um modelo matemático polinomial de primeiro grau, e o método de interpolação vizinho mais próximo para o reposicionamento e ajuste de cada pixel da imagem.

A correção atmosférica das imagens foi realizada usando a técnica de subtração dos pixels escuros ou Dark Object Subtraction (DOS) proposta por Chavez (1988), de modo a amenizar o efeito de dispersão da energia eletromagnética nas partículas de água suspensas na atmosfera. Essa

correção permite que alvos que não variam temporalmente possam ser interpretados da mesma forma.

Os grupos temáticos de uso e ocupação de solo na bacia foram separados com base em técnicas de geoprocessamento. A escolha da composição colorida usada para efetuar o processo foi realizada de acordo com a curva de resposta dos alvos para todas as bandas dos satélites Landsat, com exceção do Landsat 8. O mapeamento da vegetação e delineamento dos corpos d'água foi realizado utilizando a banda 5, que demonstra uma boa distância entre as curvas de vegetação e solo, evidenciando uma boa diferenciação. Em seguida, definiu-se uma composição colorida utilizando as bandas do vermelho, infravermelho-próximo e infravermelho médio nos canais RGB para os sensores utilizados (Junges et al., 2013). Fez-se o uso, então, do algoritmo ISODATA para a separação de 10 grupos de pixels com características homogêneas. Esse método utilizou características referentes às estatísticas das imagens para estabelecer os critérios de separação, por isso não dependeu de treinamento fornecido pelo usuário. O raster gerado a partir do processo de classificação foi utilizado, juntamente com os dados dos pontos levantados em campo, para gerar os arquivos vetoriais e cálculo das áreas associadas aos diferentes usos do solo identificados na Bacia do Açude Acarape do Meio, quais sejam: área urbana, corpos d'água, cultivos agrícolas, vegetação arbustiva, vegetação nativa e vegetação antropizada.

## RESULTADOS

Por meio dos dados de pluviometria dos postos utilizados obtiveram-se valores de erosividade da chuva anuais, que variaram de 1977 a 17049  $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ , referentes aos anos de 1993 e 2009, respectivamente. A média anual para a bacia foi de 8317  $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ , valor próximo ao encontrado por Araújo (2003), de 8135  $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ , para a bacia do açude Acarape do Meio, no período de 1924 a 1997.

Os valores do fator K, obtidos por meio das análises das amostras, variaram entre 0,023 e 0,051  $\text{t}\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ . Com a espacialização dos dados obteve-se um valor médio para a bacia de 0,033  $\text{t}\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ , similar ao valor de 0,037  $\text{t}\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$  obtido por Araújo (2003).

Após o processamento dos dados SRTM foram observados valores de declividade ( $S_R$ ) variando de 0,11 a 96,70%, e valor médio de 20,20%. O comprimento de rampa obtido para a bacia foi de 30,08 m. A partir desses resultados foi calculado o fator LS para a bacia, cujos valores obtidos variam de 0,006 a 18,498, apresentando valor médio para a bacia de 3,033, discretamente superior ao encontrado por Araújo (2003) de 2,77.

Os valores anuais obtidos para o fator cobertura vegetal (fator C) variaram de 0,011 a 0,041, referentes aos anos de 1985 e 1997, respectivamente. A Figura 2 apresenta o mapeamento do uso do solo na bacia para estes anos, indicando o uso do solo bem intenso em 1997 com acréscimo da área

antropizada, como resultado de uma política de incentivo à produção agrícola na região. Nota-se, ainda, na Figura 2, que a produção agrícola intensa estava presente mesmo em regiões mais declivosas nas cabeceiras da bacia, o que impulsiona a erosão na área.

Com a superposição dos mapas de fatores da USLE foi possível estimar a erosão na bacia e a identificação de áreas mais vulneráveis e, portanto, fontes potenciais de produção de sedimentos na bacia para todo o período analisado (1985-2013). A Figura 3 para ilustra mapas de erosão na bacia do Acarape do Meio, exemplarmente para os anos de 1985 e 1997, notáveis por apresentar maior estado de conservação e de degradação na área, respectivamente. Como resultado direto do aumento da produção agrícola na bacia no início da década de 90, pode-se observar, na Figura 3, um considerado aumento em áreas com erosão mais acentuada, mostrando a notável influência da variabilidade do fator C na estimativa da erosão por meio USLE. Vale destacar que a erosividade da chuva na bacia para o ano de 1985 foi de  $9271 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ , enquanto que em 1997 foi de  $3748 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$  (60% inferior) e, ainda assim, a produção de sedimento neste ano foi 54% superior a do ano anterior.

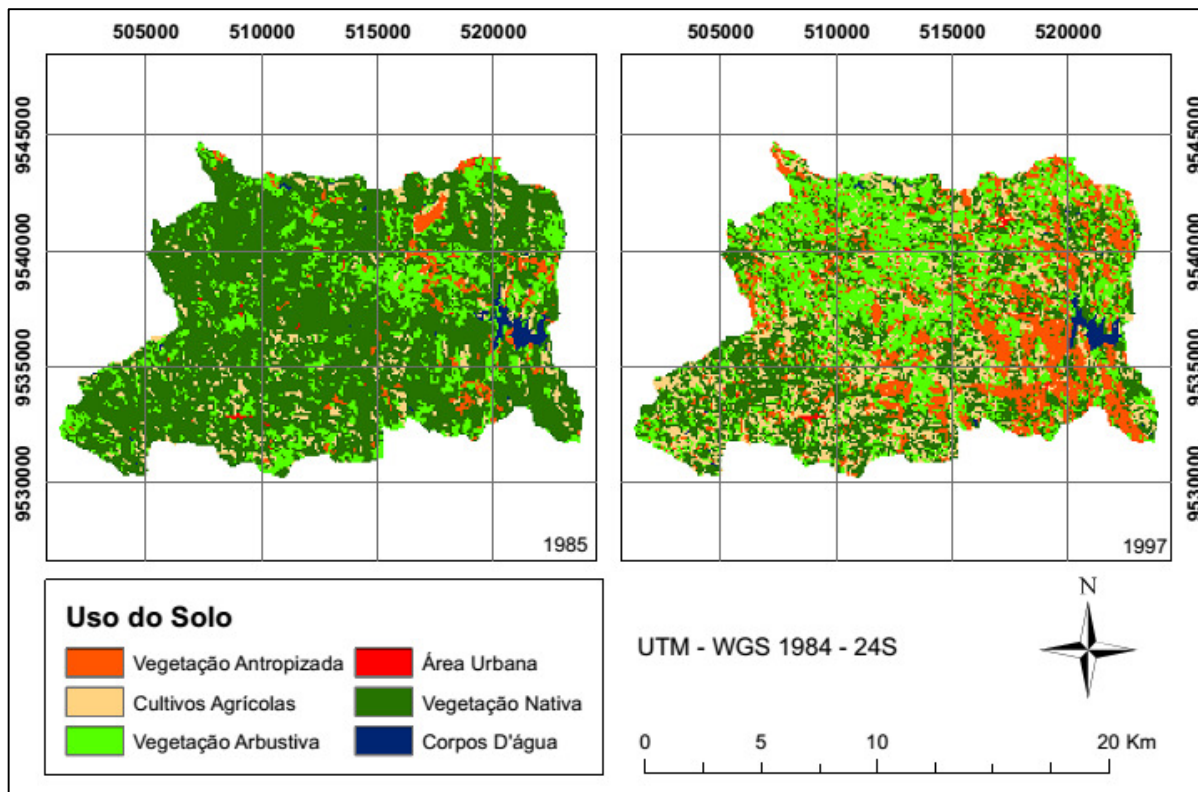


Figura 2 – Uso do solo na bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio para os anos de 1985 e 1997.



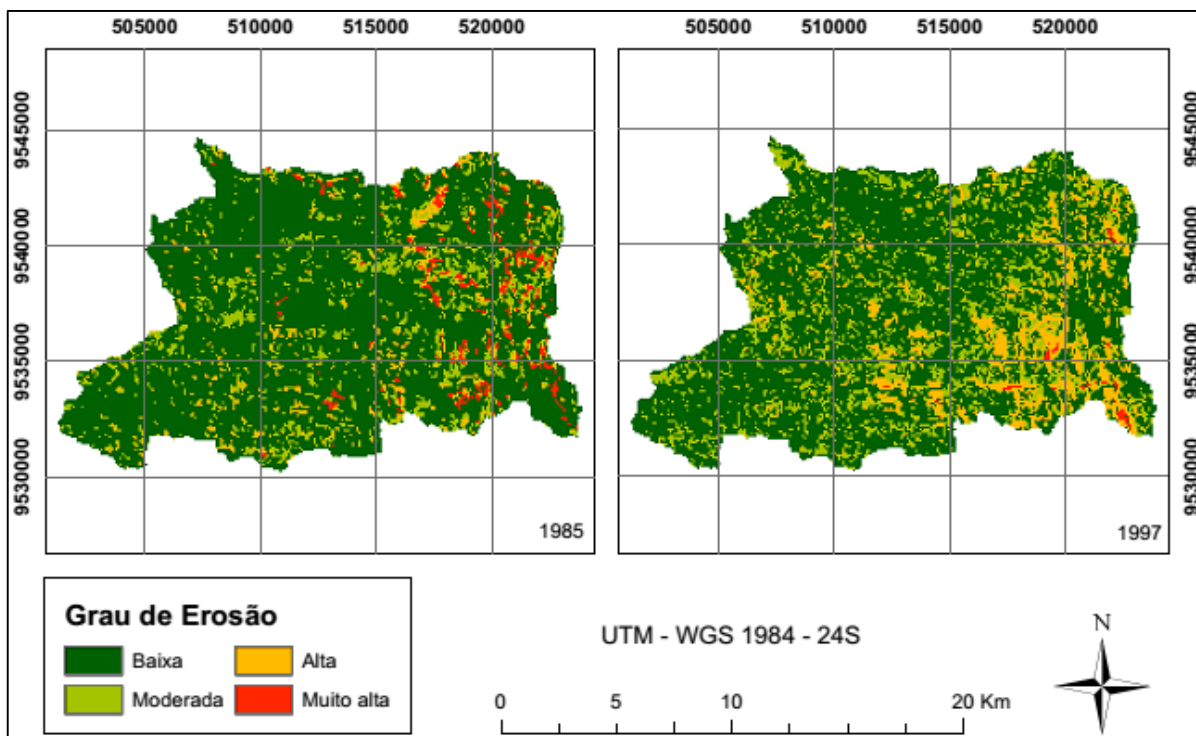


Figura 3 – Grau de erosão na bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio para os anos de 1985 e 1997

Com o intuito de entender a dinâmica temporal da produção de sedimentos na bacia, plotou-se na Figura 4 a variabilidade anual dos valores médios dos fatores R e C, e da erosão localizada (Figuras 4a, 4b e 4c, respectivamente). Complementarmente, com o intuito de se analisar o comportamento da série de dados, apontando tendências de crescimento ou redução dos valores médios apresentam-se as médias móveis referentes de 5 anos para as variáveis fator R, fator C e erosão localizada (Figuras 4d, 4e e 4f, respectivamente).

A dinâmica dos processos erosivos destacados na Figura 4c é relativamente bem explicada pela variabilidade da erosividade da chuva (Figura 4b), dado que a mobilização de partículas é resultado da maior ou menor intensidade da chuva e volume precipitado no período. No entanto, a análise da variabilidade do fator R não explica padrões temporal dos processos erosivos na bacia, ou seja, as tendências de atenuação ou de intensificação da erosão na área. Estas mudanças de comportamento do padrão de produção de sedimentos na bacia é evidenciada na correlação do fator C (Figura 4a) com a erosão localizada (Figura 4c). As médias móveis de cinco anos geradas para cada uma destas variáveis reforçam esta afirmativa, com comportamentos bastante similares para o fator C (Figura 4d) e erosão localizada (Figura 4f), no período de 1985 a 2013. Os resultados mostram que baixos valores médios de erosão anual estão associados à exploração do solo para atividades agrícolas pouco expressiva no início da série. Nos anos seguintes, de 1994 a 1997,

observa-se um significativo acréscimo no valor médio do fator C, que pode ser explicado pelos incentivos às atividades agrícolas ocorridas nesse período. A partir de 1997, nota-se um decaimento, embora menos expressivo, do valor do fator C, proveniente de uma possível recuperação do solo, ao longo do tempo, resultante da redução da exploração agrícola na região e da regeneração da vegetação. Observa-se que adoção de medidas de controle e remediação tem respostas em médio e longo prazo e, muitas vezes, não consegue restabelecer as condições originais de conservação na bacia.

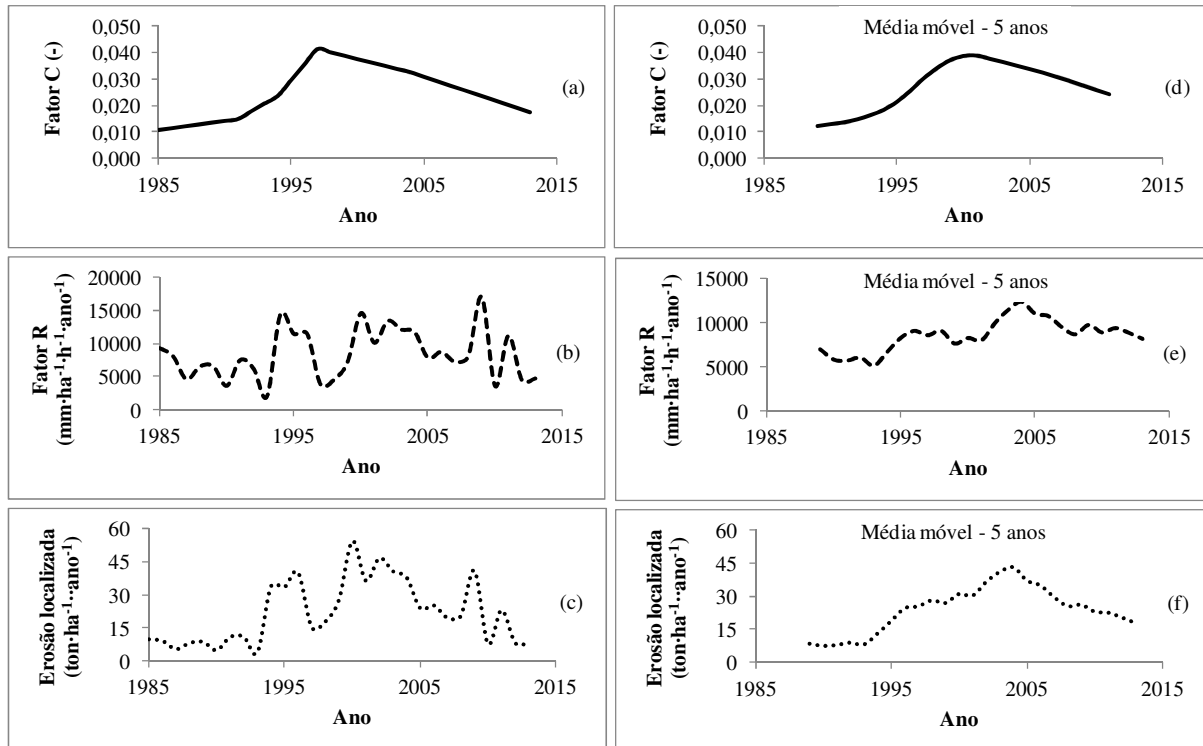


Figura 4 – Variabilidade anual das variáveis fator C (a); fator R (b) e erosão localizada (c), e média móvel destas variáveis para 5 anos (d, e, f, respectivamente).

Os resultados da aplicação do modelo Hidrosed, associado às ferramentas de SIG, indicam uma perda de solos na bacia de 21,9 ton.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, o que pode ser considerada moderada. A partir da aplicação dos conceitos de SDR e da eficiência de retenção de sedimentos do reservatório principal pelo método de Brune, descritos anteriormente, estimou-se o assoreamento no reservatório principal, em unidades de massa, de aproximadamente 4,70 milhões de toneladas no período de 1985 a 2013, ou o equivalente a um volume de 3,56 hm<sup>3</sup>, considerando uma massa específica aparente seca do sedimento de 1,32 t.m<sup>-3</sup>. A Figura 5 apresenta a redução da capacidade do açude Acarape do Meio em função do tempo para o período de simulação (1985-2013). Comparando-se os resultados do modelo com o assoreamento estimado com base nas capacidades de armazenamento

do açude Acarape do Meio determinadas nos levantamentos batimétricos de 1997 e 2011, observam-se valores bem similares de 2,37 hm<sup>3</sup> (modelado) e 1,76 hm<sup>3</sup> (medido). Vale destacar que o assoreamento observado no período inicial de 1924 (ano de construção) a 1997 (batimetria) foi de 2,67 hm<sup>3</sup>, o que representa uma taxa de assoreamento 3,3 vezes inferior àquela observada no período de 1997 a 2011, o que pode ser explicado pela intensificação da degradação dos solos na bacia decorrente elevada produção agrícola na área no início da década de 90.

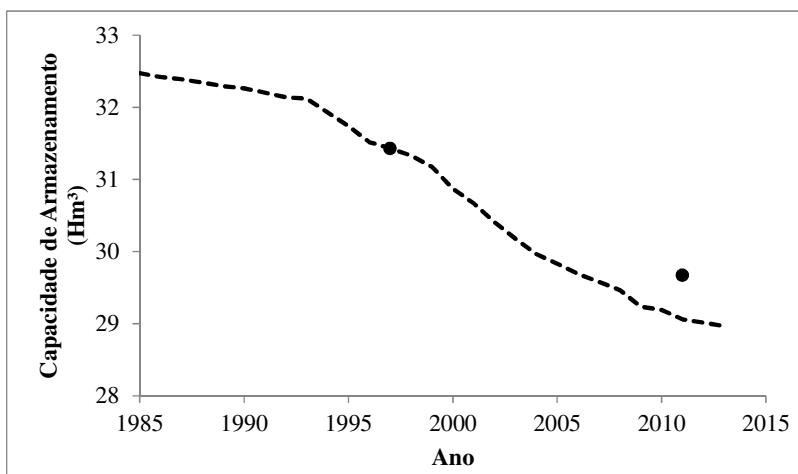


Figura 5 – Simulação de redução da capacidade de armazenamento do reservatório Acarape do Meio. Os pontos destacados correspondem aos valores da capacidade do reservatório indicados por batimetrias realizadas nos anos de 1997 e 2011

A aplicação do modelo Hidrosed combinado com ferramentas de SIG possibilitou uma análise criteriosa da evolução do uso do solo na bacia, para o período de 1985 a 2013, permitindo incorporar ao modelo a variabilidade temporal do fator C da USLE. A Figura 5 sugere, ainda, que as taxas de assoreamento são menos elevadas entre 1985 e os primeiros anos da década de 90, devido à maior conservação do solo nesse período; e mais elevadas no período de 1995 até 2005, como resultado do aumento da atividade agrícola nos primeiros anos desse segundo período e de elevada precipitação nos anos posteriores. A partir de 2005, as taxas de assoreamento são menos expressivas, como resultado da recuperação dos solos da bacia e de baixos valores de erosividade da chuva.

É importante notar que na estimativa da variabilidade do fator C e, conseqüente, aplicação na USLE, utilizou-se imagens de satélite de período úmido. Ao considerar dados coletados em períodos não chuvosos tende-se a obter uma elevação dos valores do fator C para a bacia, em virtude da característica da vegetação no bioma caatinga, com perda de folhagem nos períodos secos, resultando em valores de reflectância similares aos obtidos em vegetação degradada, ao

passo que no período chuvoso a vegetação repõe toda a folhagem e os dados coletados por satélites tendem então a refletir adequadamente àquele tipo de vegetação (Silva et al., 2014).

## **CONCLUSÕES**

Pode-se concluir, portanto, que o modelo Hidrosed combinado com ferramentas de SIG apresentou desempenho satisfatório na estimativa da variabilidade interanual da produção de sedimentos na bacia. Os valores de assoreamento no reservatório Acarape do Meio gerados pelo modelo se assemelham bastante àqueles oriundos de levantamentos batimétricos consecutivos realizados nos anos de 1997 e 2011.

A metodologia proposta possibilitou, ainda, uma análise criteriosa da evolução temporal dos usos do solo na bacia do açude Acarape do Meio, utilizando seis imagens de satélite, e dos impactos decorrentes de alterações de uso na produção de sedimentos e, conseqüente assoreamento daquele manancial.

Os resultados indicaram, ainda, que o padrão temporal da produção de sedimentos está diretamente relacionada com alterações no fator de uso do solo (fator C). Ações degradantes apresentam respostas imediatas em termos de intensificação de processos erosivos, enquanto que ações de remediação tem resultados em médio e longo prazo, muitas vezes não conseguindo restabelecer as condições originais de conservação. Portanto, a adoção de medidas de conservação da vegetação nativa e manejo agrícola adequado deve ser implementada nos estágios iniciais de degradação para que as respostas de atenuação de processos erosivos sejam mais expressivas.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de mestrado concedida à segunda autora e de iniciação científica ao terceiro autor, e por financiar o desenvolvimento da pesquisa.

## **BIBLIOGRAFIA**

ARAÚJO, J.C. (2003). *Assoreamento em reservatórios do semi-árido: modelagem e validação*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 8(2), 39-56.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. (1990). *Conservação do solo*. São Paulo: Editora Ícone, 335 p.

BRUNE, G.M. (1953). *Trap Efficiency of Reservoirs*. Trans. American Geophysical Union. Vol. 34, n.3, June.

- CHAVEZ, J.P.S. (1988). *An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data*. Remote Sensing of Environment. New York, v.24, p. 459-479.
- CHEN, E.; MACKAY, D.S. (2004). *Effects of distribution-based parameter aggregation on a spatially distributed nonpoint source pollution model*. J. Hydrol. 295, 211–224.
- CREUTZFELDT, B.N.A. (2006). *Remote sensing based characterization of land cover and terrain properties for hydrological modelling in the semi-arid Northeast of Brazil*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Potsdam, Alemanha.
- FERNANDES, L. (2000). *Processo hidrossedimentológico na bacia do açude Acarape do Meio, Ceará*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, janeiro, 93p.
- JUNGES, A.H.; FONTANA, D.C.; PINTO, D.G. (2013). *Identification of Croplands of Winter Cereals in Rio Grande do Sul State, Brazil, Through Unsupervised Classification of Normalized Difference Vegetation Index Images*. Journal of Brazilian Association of Agricultural Engineering, v. 33, n. 4, p. 883–895.
- KAVVAS, M.L.; CHEN, Z.Q.; DOGRUL, C.; YOON, J.Y.; OHARA, N.; LIANG, L.; AKSOY, H.; ANDERSON, M.L.; YOSHITANI, J.; FUKAMI, K.; MATSUURA, T. (2004). *Watershed Environmental Hydrology (WEHY) model based on upscaled conservation equations: hydrologic module*. J. Hydrol. Engng ASCE 9(6), 450–464.
- KUSIMI, J.M.; AMISIGO, B.A.; BANOENG-YAKUBO, B.K. (2014). *Sediment yield of a forest river basin in Ghana*. Catena, v. 123, p. 225–235.
- LIMA NETO I.E.; WIEGAND M.C.; DE ARAÚJO J.C. (2011). *Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin*. Hydrol Sci J 56:319-333. doi 10.1080/02626667.2011.553616.
- LIRA, D.L.C.; TOLEDO, C.E.; MAMEDE; G.L. (2014). *Silting in the dense reservoir network of the Pereira de Miranda catchment*. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.34, n.4, p.
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. (1992). *Erosividade da chuva: Sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP*. Bragantia, 51, 2, 189-196.
- MAMEDE, G. L., ARAUJO, J. C., BRONSTERT, A. (2007). *Global change scenarios in the prediction of reservoir sedimentation*. IAHS-AISH Publication. , v.317, p.137 - 141, 2007
- MAMEDE, G.L.; ARAUJO, N.A.M.; SCHNEIDER, C.M.; ARAUJO, J.C.; HERRMANN, H.J. (2012). *Overspill avalanching in a dense reservoir network*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109, 7191-7195.

MÜLLER, E.N.; GÜNTNER, A.; FRANCKE, T.; MAMEDE, G.L. (2010). *Modelling sediment export, retention and reservoir sedimentation in drylands with the WASA-SED Model*. Geosci Model Dev 3:275-291. doi 10.5194/gmd-3-275-2010

SILVA, F.K.G. et al. (2014). *Patterns of species richness and conservation in the Caatinga along elevational gradients in a semiarid ecosystem*. Journal of Arid Environments, v. 110, p. 47–52.

SOUSA, D.C.B. (2013). *Utilização de lógica fuzzy e sensoriamento remoto no monitoramento do uso do solo: estudo de caso da bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Brasil.

TRUSH, W.J.; MCBAIN, S.M.; LEOPOLD, L.B. (2000). *Attributes of an alluvial river and their relation to water policy and management*. Proc Natl Acad Sci USA 97:11858-11863. doi 10.1073/pnas.97.22.11858.

VERSTRAETEN, G.; PROSSER, I.P. (2008). *Modelling the impact of land-use change and farm dam construction on hillslope sediment delivery to rivers at the regional scale*. Geomorphol 98:199-212. doi 10.1016/j.geomorph.2006.12.026.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook, nº. 537, Washington D.C.

WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, V. (1971) *A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites*. Journal of Soil and Water Conservation, v. 5, n. 5, p. 189-193.

YANG, X.; LU, X.X. (2014). *Estimate of cumulative sediment trapping by multiple reservoirs in large river basins: An example of the Yangtze River basin*. Geomorphology, v. 227, p. 49–59.