



Potencial natural de erosão e limite de tolerância de perdas de solo em bacia hidrográfica na região do brejo paraibano

Natural potential of erosion and tolerance limit of loss of soil in a hydrographic basin in the region of brejo paraibano

Paulo Roberto Megna Francisco¹, Djail Santos², Thiago Pereira de Brito²

¹ Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil

² Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, Brasil

Contato: paulomegna@gmail.com

Palavras-Chave

risco de erosão
erosão potencial
geoprocessamento

Key-word

erosion risk
potential erosion
geoprocessing

RESUMO

Este trabalho estimou o limite de tolerância de perda de solo (LTP) e o potencial natural de erosão (PNE) da bacia hidrográfica de Vaca Brava localizada na região do Brejo Paraibano utilizando técnicas de geoprocessamento e a linguagem algébrica do SPRING para a modelagem dos dados. Os resultados mostraram que o LTP da classe muito alta ocorreram em 95,53% da bacia estando associadas ao Argissolo e ao Latossolo. O fator S apresentou maior influência ao potencial natural a erosão em relação aos fatores R com 100% na classe média e K com 82,47% também na classe média.

ABSTRACT

This study evaluates the limit of tolerance of soil loss (LTP), and the natural erosion potential (PNE) of the watershed Vaca Brava using techniques of geoprocessing and algebraic language of SPRING for data modeling. The results showed that the LTP of the very high class soils occurred in 95.53% of the basin, being associated with Argisol and Latosol. The S factor had a greater influence on the natural erosion potential compared to the R factors with 100% in the middle class and K with 82.47% also in the middle class.

Informações do artigo

Recebido: 22 de junho, 2021

Aceito: 21 de novembro, 2021

Publicado: 30 de abril, 2022

Introdução

As alterações dos atributos e dos processos do solo durante um longo período de tempo ocasionam a perda da função dos ecossistemas e a produtividade agrícola, gerando uma desordem de modo que a terra não se recupera rapidamente sem auxílio antrópico (PALM et al., 2007; BAI et al., 2008). Por meio dessa modificação de atributos e processos do solo, a sua deterioração prejudica o desenvolvimento sustentável de muitos dos serviços ecossistêmicos (PALM et al., 2007).

A erosão é um processo natural resultante da ação da chuva e do vento sobre as superfícies continentais. Com intervenções inadequadas das atividades humanas sobre o meio ambiente, como a supressão da cobertura vegetal para a introdução de práticas agrícolas e pecuárias, a exploração de bens minerais e implantação de núcleos urbanos, os processos erosivos se intensificam e passam a comprometer os principais recursos naturais do planeta, em particular, o solo e a água superficial (CARVALHO et al., 2010; CARVALHO e PINTO, 2010). Segundo estes autores, as carências de informações sobre a capacidade de suporte do meio físico e a deficiência de uso de técnicas conservacionistas adequadas às limitações das terras, têm sido a causa principal dos desequilíbrios nos sistemas ambientais.

A Equação Universal de Perdas de Solo é um modelo matemático simplificado, que permite estimar a perda média anual de solo de áreas agrícolas provocada pela chuva. A estimativa de perdas de solo (A) é dada em megagrama por hectare ($Mg\ ha^{-1}$); a erosividade da chuva (fator R) é expressa em megajoule por hectare por milímetro ($MJ\ ha^{-1}\ mm^{-1}$) e os demais fatores – (K) erodibilidade do solo, (L) comprimento do declive, (S) grau do declive, (C) cobertura ou uso do solo e (P) prática conservacionista – são relações numéricas entre as perdas de solo observadas e as perdas ocorridas para uma condição padrão de determinação (WISCHMEIER e SMITH, 1978).

A erosividade da chuva (Fator R) está relacionada à sua intensidade, duração e frequência de ocorrência. Aumentando a intensidade da chuva aumenta o tamanho médio das gotas, a energia de impacto, bem como, o escoamento, aumentando a energia de transporte (WISCHMEIER e SMITH, 1978). A erodibilidade do solo (Fator K) é um atributo complexo e é considerado como a suscetibilidade com que o solo é desagregado por salpicos durante a chuva ou por escoamento superficial ou ambos (RÖMKENS et al., 1997). Este fator é afetado pelas propriedades intrínsecas do solo, como a textura, estabilidade de agregados, resistência ao cisalhamento, capacidade de infiltração de água e demais atributos químicos e orgânicos (BLANCO e LAL, 2008; MORGAN, 2015). Tendo em vista o solo ser responsável pela resistência à erosão, a erodibilidade depende em grande parte também da posição topográfica, declive (Fator S) e da perturbação durante o cultivo (MORGAN, 2015). O estudo da estimativa da erodibilidade tem gerado um amplo interesse nas últimas décadas, e a partir disso, diversos autores têm estudado a obtenção do fator K como Zhang et al. (2008), Wei e Zhao (2017), Cutillas et al. (2019), Marquez et al. (1997), Silva et al. (2009).

Francisco e Chaves (2017) afirmam que modelos relativamente simples podem descrever com certo grau de confiança os processos de degradação ambiental, facilitando a complementação de diagnósticos integrados dos recursos naturais e das suas relações com as atividades humanas.

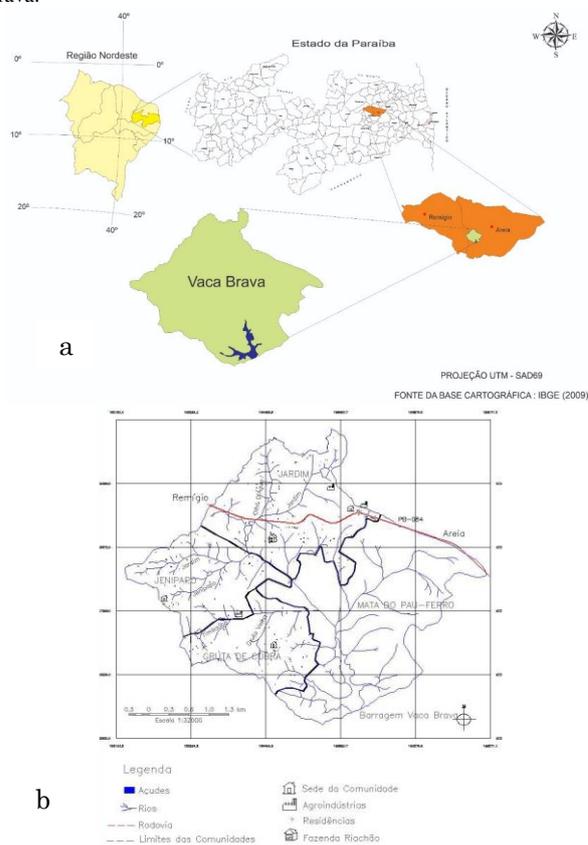
A Linguagem Espaço-Geográfico baseada em Álgebra (LEGAL) realiza operações algébricas de mapas tanto em sentido matemático quanto cartográfico e espacial (FRANCISCO, 2010). É uma ferramenta que possibilita a realização de análises espaciais através de álgebra de mapas, podendo fazer simulações sobre os fenômenos do mundo real (CÂMARA et al., 1996).

Portanto, este trabalho propõe estimar o limite de tolerância de perdas dos solos (LTP) da bacia Vaca Brava, e o potencial natural de erosão (PNE) utilizando os Fatores K, R e S.

Material e Métodos

A bacia hidrográfica da represa Vaca Brava localiza-se nos municípios de Areia e Remígio, na região do Brejo Paraibano, nos contrafortes do Planalto da Borborema (Figura 1a) com uma altitude média de 637 m e temperatura média anual de 24°C (SANTOS et al., 2004). Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo As' tropical com chuvas de inverno com precipitação média anual de 1.400mm (ALVARES et al., 2013) e apresenta uma área de 14,043 km² (Figura 1b).

Figura 1. a) Localização da área de estudo; b) Mapa base da bacia Vaca Brava.

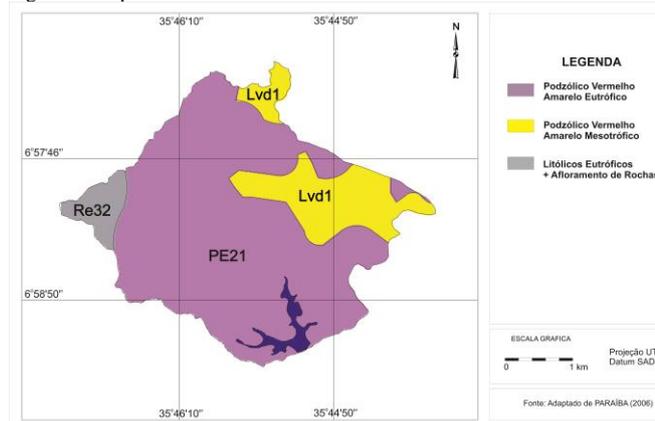


Fonte: a) Adaptado de IBGE (2009); b) Farias (2006).

A vegetação representativa da área de estudo é de porte florestal que se localiza inserida no Parque Estadual Mata do Pau-Ferro (ANDRADE & MACHADO, 2018) enquanto que na área sob uso antrópico, compreende por vegetação do tipo capoeira e por reflorestamento com sabiá (*Mimosa caesalpinifolia*) como também áreas de uso agropecuário (capineira e roçado) (SANTOS, 2004).

Os solos predominantes de acordo com PARAIBA (2006) são o PODZÓLICO VERMELHO AMARELO EUTRÓFICO Tb, com A proeminente, textura argilosa, fase floresta subcaducifólia, relevo ondulado e forte ondulado; SOLOS LITÓLICOS EUTRÓFICOS + AFLORAMENTOS DE ROCHA; LATOSOL VERMELHO AMARELO DISTRÓFICO textura média fase floresta subperenifólia relevo plano; e SOLOS ALUVIAIS EUTRÓFICOS Ta, textura indiscriminada, fase floresta perenifólia de várzea, relevo plano (Figura 2). Atualmente reclassificados por Campos e Queiroz (2006) como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abruptico; Neossolo Litólico Eutrófico típicos; Latossolo Amarelo Distrófico argissólico; Neossolo Flúvico Ta Eutrófico solódico, respectivamente (Figura 2).

Figura 2. Mapa de solos da área de estudo.



Fonte: Adaptado de PARAIBA (2006)

Neste trabalho foi adotada a metodologia utilizada por Francisco e Chaves (2017), onde para a elaboração do mapa de declividade foi utilizado um mosaico digital do SRTM dos quadrantes SB24ZB, SB24ZD da área de estudo e a partir deles foram geradas as curvas de nível com equidistância de 10 metros. Para gerar a grade triangular foi criada uma base de dados no programa SPRING 5.2 na projeção UTM/SAD69; em seguida foi realizado o fatiamento da grade triangular com o estabelecimento dos limites de classes de declive, procedendo-se o mapeamento em cinco classes (Tabela 1) (FRANCISCO, 2010).

O fator declividade (S) foi calculado pela equação ajustada por Bertoni e Lombardi Neto (1990) representada pela Equação 1.

$$LS = 0,00984 L^{0,63} \times S^{1,18} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: o comprimento de rampa (L) foi considerado igual à medida padrão de 25 metros.

Tabela 1. Classes de declividade

Classes de Declividade	Declive (%)	Classes de Risco	Fator S
Plano	0-3	Muito Baixo	<0,273
Suave Ondulado	3-6	Baixo	<0,619
Moderadamente Ondulado	6-12	Médio	<1,403
Ondulado	12-20	Alto	<2,564
Forte Ondulado/Montanhoso	>20	Muito Alto	>2,564

Fonte: Francisco (2010)

Os índices de vulnerabilidade das classes foram estabelecidos de forma progressiva procurando-se simular a aceleração do processo erosivo. Procedeu-se o mesmo critério para os demais parâmetros do modelo: erodibilidade do solo e erosividade.

A erodibilidade dos solos (K) da bacia foi determinada pela equação proposta por Denardin (1990), para o conjunto dos solos brasileiros e americanos, simplificada por Chaves et al. (2004) para os dois principais parâmetros, o fator granulométrico M e a permeabilidade do solo P.

Na elaboração do mapa de erodibilidade foi criada uma planilha no Excel em que cada polígono de solo da área de estudo, baseado nas informações contidas nos perfis representativos de BRASIL (1972) e PARAÍBA (1978), teve calculado sua erodibilidade, baseada na metodologia proposta por Chaves et al. (2004).

Nesta proposta os autores considerando a possibilidade de obtenção dos dados do boletim de solos brasileiro, através de um artifício para estimativa dos dados de granulometria a partir da classificação internacional para a classificação americana, utilizam o modelo proposto por Denardin (1990), para estimar a erodibilidade dos solos e que tem a seguinte expressão matemática determinada pela Equação 2.

$$K = 0,00000748 (X_{25}) + 0,00448059 (X_{29}) - 0,06311750 (X_{27}) + 0,01039567 (X_{32}) \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: K, é o valor a ser estimado para o fator erodibilidade do solo, expresso em $\text{Mg hMJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$; X_{25} , é a variável granulométrica “M”, calculada a partir da determinação pelo método da pipeta; X_{29} , é a permeabilidade do perfil de solo, codificada conforme Wischmeier et al. (1971); X_{27} , é o diâmetro médio ponderado das partículas menores do que 2mm, expresso em mm; X_{32} , é a relação entre o teor de matéria orgânica e o teor da “nova areia” determinada pelo método da pipeta.

Considerando o alto grau de determinação do parâmetro X_{25} (variável granulométrica “M”), com $r^2 = 0,9461$, a estimativa da erodibilidade dos solos foi calculada pela equação de K, reduzida aos dois primeiros parâmetros, cuja expressão matemática ajustada por Denardin (1990) passou a ser conforme a Equação 3.

$$K = 0,00000797 (X_{25}) + 0,0029283 (X_{29}) \quad (r^2 = 0,9561) \quad (\text{Eq. 3})$$

A variável “M” é um artifício que exalta a ocorrência das frações granulométricas do solo mais facilmente dispersas e transportadas pela água, o silte e a areia muito fina. Essas frações agrupadas numa mesma classe textural, passaram a ser denominada de fração “novo silte (NS)” enquanto, a fração areia com a subtração da fração areia muito fina, passou a ser denominada de “nova areia (NA)” (WISCHMEIER et al., 1971). Assim, a variável “M” é expressa pelo produto entre os valores percentuais da fração novo silte, vezes a soma das frações novo silte + nova areia ($M = NS \times (NS + NA)$).

Nos boletins de solos brasileiros o resultado da análise granulométrica é apresentado na classificação internacional, enquanto, originalmente, a variável “M” utiliza os dados da classificação americana; assim, para a conversão dos dados granulométricos da classificação internacional dos boletins de solos brasileiros, com vista à classificação americana, Chaves et al. (2004) propuseram a Equação 4.

$$M = 640,03 e^{0,0003 M_i} \quad (r^2 = 0,8214) \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo: M = valor de “M” corrigido, ou da variável X_{25} do modelo de Denardin, e M_i = valor obtido do boletim de solos (classificação internacional).

A estimativa da permeabilidade dos solos (variável X_{29}) foi realizada a partir da correspondência entre as classes de drenagem descritas no boletim de solos (BRASIL, 1972) e as classes de permeabilidade propostas e codificadas por Wischmeier et al. (1971) (Tabela 2).

Tabela 2. Correspondência entre classes de drenagem e permeabilidade

Classes de Drenagem	Classes de Permeabilidade
Muito mal drenado	Muito lenta
Mal drenado	Muito lenta
Imperfeitamente drenado	Lenta
Moderadamente drenado	Lenta a moderada
Bem drenado	Moderada
Acentuadamente drenado	Moderada a rápida
Fortemente drenado	Rápida
Excessivamente drenado	Rápida

Fonte: BRASIL (1972); Wischmeier et al. (1971)

Para as descrições de drenagem intermediárias entre duas classes do tipo “bem drenado a acentuadamente drenado”, adotou-se uma codificação de valor intermediário, exemplo, 2,5. Os dados sobre textura (X_{25}) e permeabilidade (X_{29}) foram interpretados e calculados a partir da ordenação dos dados dos perfis de solos descritos no Boletim de Solos do Estado da Paraíba (BRASIL, 1972).

Na metodologia para o enquadramento das classes utilizou-se o valor da erodibilidade do solo representativo de cada unidade de mapeamento, ou seja, o solo dominante de cada associação de solo. Para cada solo foi considerado apenas o valor da erodibilidade do horizonte superficial; assim, para cada polígono do mapa foi atribuído um valor representativo de erodibilidade; em seguida, agrupados em cinco classes de erodibilidade. Com vista à elaboração do mapa de erodibilidade do solo no SPRING foi realizada a classificação para o enquadramento das classes definidas conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Classes de erodibilidade dos solos

Classes de Risco	Erodibilidade - Fator K (Mg mm MJ ⁻¹ ha ⁻¹)
Muito Baixa	< 0,01
Baixa	0,01 - 0,02
Média	0,02 - 0,03
Alta	0,03 - 0,04
Muito Alta	> 0,04

Fonte: Francisco (2013)

Para a elaboração do mapa do Potencial Natural de Erosão (PNE), foi estimado pelo produto dos parâmetros da Equação 6.

$$\text{Erosividade da chuva (R) x Erodibilidade do solo (K) x Declividade (S)} \quad (\text{Eq. 6})$$

Para os cálculos foi utilizada uma planilha eletrônica e para a modelagem a linguagem de programação LEGAL, subprograma do SPRING, conforme Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros para estimativa do PNE e do LTP

Classes de Risco	Erosividade Fator R (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ ano ⁻¹)	Erodibilidade Fator K (Mg mm MJ ⁻¹ ha ⁻¹)	Declividade Fator S	PNE (R x K x S) (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Limites Tolerância Perdas (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
Muito Baixa	0 - 2000	0,00 - 0,01	< 0,273	0 - 5	0 - 3
Baixa	2000 - 4000	0,01 - 0,02	< 0,619	5 - 50	3 - 6
Média	4000 - 6000	0,02 - 0,03	< 1,403	50 - 250	6 - 9
Alta	6000 - 8000	0,03 - 0,04	< 2,564	250 - 800	9 - 12
Muito Alta	8000 - 10000	0,04 - 0,05 ⁺	> 2,564	> 800	> 12

Fonte: Francisco et al. (2021)

Para a elaboração do mapa do Limite de Tolerância de Perda (LTP) foi calculado pelo método de Smith e Stamey (1964), utilizado por Oliveira et al. (2008), que preconiza uma taxa média anual de perdas (LTP) determinada pela razão entre a profundidade do solo, em milímetros (h), e o período de tempo de desgaste de 1.000 anos.

$$LTP = H \cdot r \cdot d \cdot 1000^{-1} \quad (\text{Eq. 7})$$

Sendo: H, profundidade efetiva limitada a 1 metro; r, o gradiente textural entre horizontes B e A, que se menor de 1,5, r igual a 1,0; entre 1,5 e 2,5, r igual a 0,75 e se maior que 2,5, r igual a 0,5; e d, a densidade do solo, estimada pela relação com o C orgânico ($DS = 1,660 - 0,318 (\%COT) 0,5$, segundo Benites et al. (2007).

Para os cálculos foi utilizada uma planilha eletrônica e para a modelagem a linguagem de programação LEGAL subprograma do SPRING conforme a Tabela 5.

Resultados e Discussão

Conforme a Figura 3, no mapa de Declividade - Fator S, observa-se que a declividade da bacia é predominantemente pertencente as classes, média (6 a 9%) e alta (9 a 12%). Essas terras ocorrem de forma difusa em toda a bacia e representa área já com forte restrição ao uso

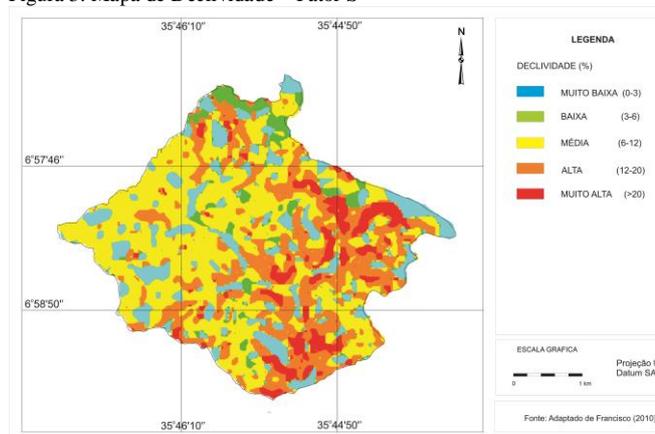
com agricultura requerendo o uso intensivo de práticas conservacionistas, que no conjunto, abrangem 68,74% da área da bacia (Tabela 6).

Observou-se que sua distribuição está associada aos solos predominantes da bacia, corroborando com as observações de Farias (2006).

As áreas mais declivosas da bacia das classes alta e muito alta se distribuem áreas de serras interiores de mata da reserva Pau dos Ferros, e também ocorrem de forma difusa em toda a bacia. A classe muito alta, representando áreas com declividades superiores a 20%, ocupam 0,941 km², representando 6,7% da área da bacia (Tabela 6).

A classe alta, normalmente ocorrendo associada à classe muito alta, ocupa uma área de 3,428 km², o que representa 24,41% da área total. No terço mais baixo da drenagem estão possivelmente e fortemente associadas aos Neossolos Flúvicos.

Figura 3. Mapa de Declividade – Fator S



De acordo com Francisco (2010), a declividade é uma componente relacionada à ação da gravidade. Francisco (2013) afirma que estudos de pesquisa em parcelas de erosão mostram que as perdas de solo aumentam exponencialmente, quando também aumenta a declividade do terreno; sendo assim, é de se esperar que, mantidas as demais condições constantes, aumentando a declividade, aumenta o risco potencial de ocorrer erosão.

Esta característica reforça a importância de conservar a topografia dos terrenos, pois solos que estão em locais declivosos apresentam maior tendência a processos erosivos, seja hídrico ou eólico, principalmente

em locais que possuam cursos de corpos d'água (VALLADARES et al., 2012).

Sales (2018) encontrou valores do fator R de 6.394,43 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹, com base de dados dos últimos 30 anos para o município de Alagoa Nova-PB, área contígua a este estudo.

Albuquerque et al. (2005) encontraram índices de erosão, para um Argissolo Vermelho-Amarelo, no município de Sumé-PB, região semiárida, de 4.928 MJ.mm.h⁻¹.ha⁻¹, com precipitação pluvial média de 695 mm.ano⁻¹. Valores próximos ao encontrado por este trabalho.

Observa-se no mapa de erodibilidade do solo – Fator K (Figura 4), que a erodibilidade está fortemente associada à presença de frações silte+areia muito fina (fator M), e de forma secundária, a permeabilidade, representados pelos Neossolo Litólico Eutrófico típicos, e pelo Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abrupto com uma área de 82,47% da bacia com valores de 0,0200 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹ e de 0,0229 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, respectivamente.

Valores médios semelhantes foram encontrados por Bueno e Stein (2004) e Silva (2008) para Argissolos Vermelho Amarelo. Francisco et al. (2019) encontraram para estes solos na bacia do Alto curso do rio Paraíba o valor de 0,0226 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹.

As classes de erodibilidade muito baixa, alta e muito alta, com valores inferiores a 0,01 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, e superiores a 0,05 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, respectivamente, não tiveram qualquer representante.

Pelos dados das Tabelas 6 e 7, observa-se que a classe de erodibilidade baixa com valores de erodibilidade de 0,163 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹ ocupa uma área de 2,46 km² da bacia, representando 17,53% da área total onde o solo representativo desta classe de erodibilidade é o Latossolo Amarelo Distrófico argissólico.

Chaves et al. (2004), encontraram utilizando esta mesma metodologia para os solos de todo o Estado da Paraíba, valores variando de 0,010 a 0,054 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, para Latossolo os autores comentam achar esta amplitude de valores relativamente pequena face à diversidade de solos, material geológico e clima, que ocorrem nas diferentes regiões geográficas do Estado.

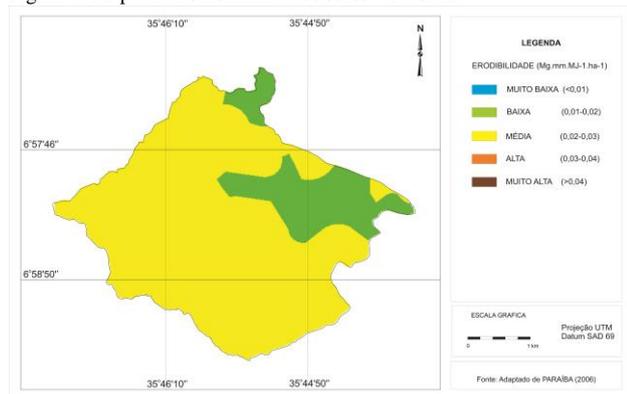
Dias (2015) estudando os solos do município de Lucena-PB encontrou valores do fator K para o Argissolo Vermelho-Amarelo de 0,032 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, valor similar a este estudo.

Tabela 6. Áreas das classes de vulnerabilidade a desertificação

Classes de risco	Fator R		Fator K		Fator S		PNE		LTP	
	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
Muito Baixa					2,616	18,630			0,627	4,465
Baixa			2,462	17,53	0,832	5,925	0,482	3,430		
Média	14,042	100	11,580	82,47	6,225	44,331	3,574	25,453		
Alta					3,428	24,412	9,986	71,117		
Muito Alta					0,941	6,701			13,415	95,535
Total	14,042	100	14,042	100	14,042	100	14,042	100	14,042	100

Fonte: Autor (2021)

Figura 4. Mapa de erodibilidade dos solos – Fator K



Na Tabela 7 são apresentados os valores dos parâmetros de determinação e da erodibilidade dos solos, com sua classificação.

Marques et al. (1997) encontraram para os Argissolos o valor de 0,029 t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹, Silva et al. (1997) obtiveram para os Latossolos o valor de 0,018 t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹, valores bem próximos aos encontrados por este trabalho. Silva et al. (2000) verificaram que os Latossolos apresentaram valores de erodibilidade entre 0,002 e 0,034 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, resultados próximos ao valor encontrado por este trabalho. Nogueira (2000) observou que os valores extremos do fator K foram para Latossolos entre 0,0169 e 0,0298 t.ha.h/ha.MJ.mm; Podzólicos entre 0,0265 e 0,0496 t.ha.h/ha.MJ.mm; e para os Litólicos entre 0,0442 e 0,0551 t.ha.h/ha.MJ.mm.

Os resultados de precipitação média mensal para a área de estudo e do resultado do cálculo do índice de

erosividade EI₃₀ em MJ ha⁻¹ mm h⁻¹ podem ser observados na Tabela 8.

Observa-se na Tabela 6, que a média da precipitação mensal apresenta valor de 114,24mm com os menores valores nos meses de outubro e novembro em 26,55 e 45,25mm, respectivamente. Os maiores valores de precipitação na bacia encontram-se entre os meses junho e julho com 205,86 e 201,22mm, respectivamente. Para os valores de erosividade, observa-se que também apresenta baixos índices para os meses de menores valores de precipitação de outubro e novembro, com valores de EI₃₀ de 317,53 e 257,40 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹, respectivamente. Para os meses junho e julho os valores são de 9.952,78 e 9.578,61 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹, respectivamente.

De acordo com Santos et al. (2010), as variações desses eventos no tempo e no espaço é característico da região semiárida. Os eventos de precipitação pluvial são fatores físicos de grande influência na magnitude das perdas de solo em regiões como essas (THOMAZ, 2009). A região Nordeste brasileira apresenta os valores mais baixos de erosividade enquanto o território brasileiro apresenta uma média observada para a erosividade variando entre 1.672 a 22.452 Mj.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ (OLIVEIRA et al., 2012), dependendo da extensão territorial e do clima local (JARDIM et al., 2017). Conforme a Figura 5, no mapa de erosividade média anual da chuva, observa-se que a erosividade da chuva na bacia é totalmente da classe média, entre 4.000 a 6.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, demonstrando esta ser uma área climaticamente homogênea. Resultados semelhantes ao encontrado por Francisco e Chaves (2017) para a bacia do rio Taperoá, sob o planalto da Borborema em clima semiárido.

Tabela 7. Parâmetros dos solos utilizados para estimativa e classificação da erodibilidade (Fator K)

Solo	Perfil Repres.	Areia (%)	Ar+Silte (%)	Mi	Mc	Drenabilidade	Fator K (Mg h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	Classe
LVd1 (Latossolo)	1	74	26	2600	1396	3	0,0199	B
Re32 (Litólico)	59	47	33	2640	1413	3	0,0200	M
PE21 (Argissolo)	22	36	43	3397	1773	3	0,0229	M

Fonte: BRASIL (1972); PARAÍBA (1978)

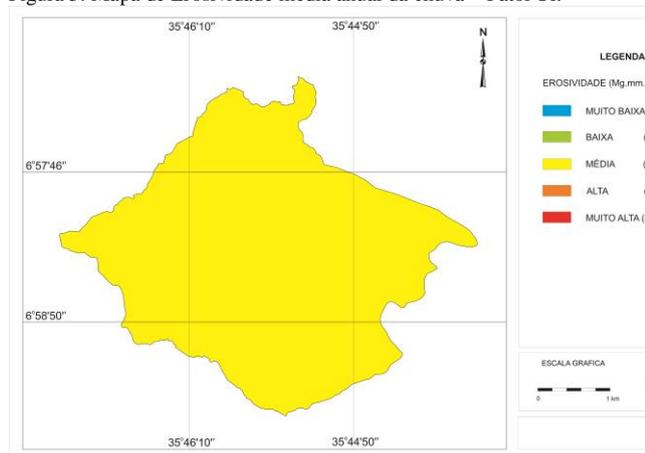
Tabela 8. Distribuição mensal média da precipitação e erosividade

Meses/Anos (1994-2019)	Precipitação média (mm)	EI ₃₀ (MJ ha ⁻¹ mm h ⁻¹)
Janeiro	130,07	4.596,83
Fevereiro	100,37	2.973,25
Março	138,34	5.100,08
Abril	152,27	5.993,28
Mai	162,60	6.692,65
Junho	205,86	9.952,78
Julho	201,22	9.578,61
Agosto	123,73	4.227,25
Setembro	61,17	1.292,59
Outubro	26,55	317,53
Novembro	23,44	257,40
Dezembro	45,25	778,51
Média	114,24	4.313,40

Fonte: adaptado de AESA (2021)

No mapa de potencial natural de erosão da bacia (Figura 6), pode-se observar que é considerado da classe média que varia entre 50 a 250 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para 25,45% da área total da bacia e da classe baixa para 3,43% das suas terras entre 0 a 5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a classe alta do PNL observa-se 71,17% da área da bacia que varia entre 250 a 800 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 8). Resultado este influenciado pela média erosividade da chuva e pela declividade do terreno devido estar localizado em regiões de altitude.

Figura 5. Mapa de Erosividade média anual da chuva – Fator R.



Observa-se no mapa de limite de tolerância de perdas dos solos (LTP) (Figura 7) que a classe, muita baixa compreende 4,46% da área da bacia (Tabela 6), estando associado à baixa profundidade efetiva do Neossolo Litólico. Para as áreas da classe muito alta de LTP, que representam 95,53% da bacia (Tabela 7), estão associadas ao Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abruptico em maior proporção e em menor ao Latossolo Amarelo Distrófico argissólico. Segundo Schick et al. (2000), a perda de solo está relacionada com a erosividade dos eventos de precipitação e da umidade do solo.

Figura 6. Mapa do potencial natural à erosão - PNE.

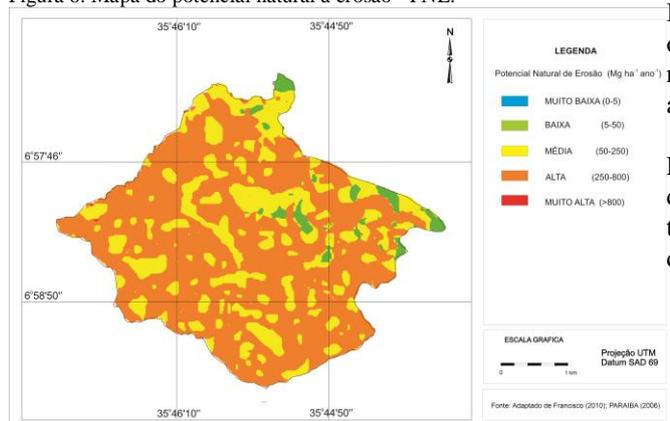
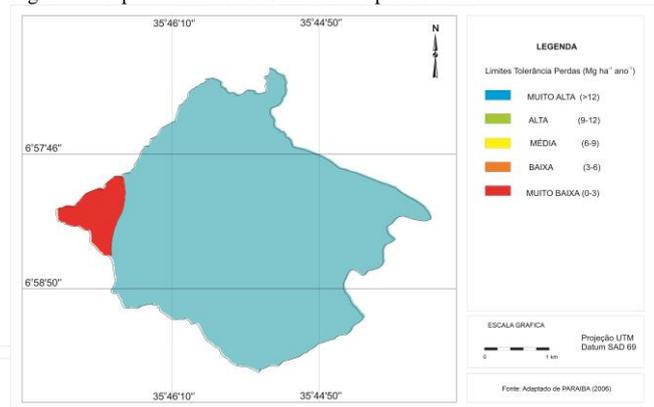


Figura 7. Mapa de limites de tolerância às perdas - LTP.



A tolerância de perda de solo segue a ordem do Latossolo > Argissolo > Neossolo. O Latossolo apresenta valor de 29,04 Mg.ha⁻¹ seguido pelo Argissolo com 17,4 Mg.ha⁻¹, enquanto o Neossolo apresenta valores de 2,64 Mg.ha⁻¹ (Tabela 9).

Sales (2018) observou que no Argissolo Vermelho Amarelo, no município de Alagoa Nova-PB a perda de solo estimada oscilou entre 3,39 e 600,38 t/ha/ano. Ao avaliar a tolerância de perdas por erosão para os principais ordens de solos do estado da Paraíba, Oliveira (2004) encontrou valores de tolerância para o Argissolo Vermelho Amarelo de 8,46 t/ha/ano.

Para Oliveira et al. (2008) os solos que apresentaram os maiores valores de tolerância foram os Latossolos, com valores médios variando de 10,6 a 13,9 t ha⁻¹ ano⁻¹. Para os Neossolos, Os autores afirmam que estes apresentam baixa profundidade efetiva, e esse fator limita o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular vegetal, diminuindo a capacidade de drenagem, e consequentemente, aumentando a suscetibilidade à erosão.

Gomes et al. (2015) observaram que, nos Neossolos em área declivosa no município de Guarabira-PB, região contígua a este estudo, os valores de perda de solos com valores médios máximos de 3,3 t ha⁻¹ ano⁻¹, que corroboram com os observados por Lombardi Neto e Bertoni (1975) em Neossolos Litólicos e Regolíticos, que obtiveram valores médios de 4,2 e 14,0 t ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. Estimativa de perdas de solos próximo aos valores obtidos neste trabalho.

Mannigel et al. (2002), estudando solos do Estado de São Paulo observaram que os valores extremos do fator erodibilidade do horizonte A foram de 0,4278 t.ha.h/ha.MJ.mm para o Argissolo e os valores extremos da tolerância de perda de solo variaram entre 3,00 t/ha.ano.

Tabela 9. Parâmetros dos solos utilizados para estimativa e classificação do LTP

Símbolo/Solos	Argila (%)	rt	r	Prof. h (mm)	Altura h.r (m)	Densidade (g/cm ³)	T (Mg.ha ⁻¹)	Classe
LAd- Latossolo Amarelo Distrófico argissólico	A = 23 e B = 29	1,3	0,75	1500	1,125	1,32	14,85	MA
RLe-Neossolo Litólico Eutrófico típicos	A = 35,0 e R = 0,0	X	0,5	350	0,175	1,32	2,31	MB
PVAd - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abruptico	A = 23,0 e B = 35,0	2	0,75	2000	1,500	1,32	19,8	MA

Fonte: Adaptado de BRASIL (1972); PARAÍBA (1978)

Conclusão

Embora apresente limitações relativas à escala de trabalho, o uso de técnicas do geoprocessamento permitiu estimar e mapear o potencial natural de erosão e limite de tolerância de perdas de solo das terras da bacia hidrográfica em estudo.

O limite de tolerância de perdas dos solos da classe muito alta ocorreram em 95,53% da bacia e estão associados ao Argissolo e ao Latossolo.

O fator S apresentou maior influência ao potencial natural a erosão em relação aos fatores R com 100% na classe média e K com 82,47% também na classe média.

Referência Bibliográfica

- AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br>. Acesso em: 25 de março de 2011.
- ALBUQUERQUE, A. W.; MOURA FILHO, G.; SANTOS, J. R.; COSTA, J. P. V.; SOUZA, J. L. Determinação de fatores da equação universal de perda de solo em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.2, p.153-160, 2005.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. DE M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2013.
- ANDRADE, L. A.; MACHADO, C. C. C. **Diagnóstico geoambiental Integrado do município de Areia, Paraíba, como subsídio para o planejamento e gestão ambiental: caracterização do uso e cobertura da terra no município de Areia-PB**. Universidade Federal da Paraíba, 2018. 24p. Disponível em: <http://www.cca.ufpb.br/cca/contents/paginas/institucional/diagnostico-geoambiental-integrado-do-municipio-de-areia>. Acesso em: 20 dezembro de 2020.
- BAI, Z. G.; DENT, D. L.; OLSSON, L.; SCHAEPMAN, M. E. Proxy global assessment of land degradation. **Soil Use and Management**, v.24, n.3, p.223-234, 2008.
- BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, v.139, p.90-97, 2007.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba, SP, LivroCeres, 1990. 132p.
- BLANCO, H.; LAL, R. **Principles of soil conservation and management**. New York: Springer, 2008.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento Exploratório e Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba**. Rio de Janeiro. Convênio MA/CONTA/USAID/BRASIL, 1972. (Boletins DPFS-EPE-MA, 15 - Pedologia, 8).
- BUENO, C. R. P.; STEIN, D. P. Potencial natural e antrópico de erosão na região de Brotas, Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.26, p.1-5, 2004.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS, C. B.; CASANOVA, M. A.; HEMERLY, A.; MAGALHÃES, G. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica**. Escola de Computação. SBC, 1996. 193p.
- CAMPOS, M. C. C.; QUEIROZ, S. B. Reclassificação dos perfis descritos no Levantamento Exploratório - Reconhecimento de solos do Estado da Paraíba. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.6, n.1, 2006.
- CARVALHO, E. M.; PINTO, S. A. F.; SEPE, P. M.; ROSSETTI, L. A. F. G. Utilização do geoprocessamento para avaliação de riscos de erosão do solo em uma bacia hidrográfica: estudo de caso da bacia do rio Passa Cinco/SP. **In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, 3. Anais...Recife, 2010.
- CARVALHO, E. M.; PINTO, S. DOS A. F. Avaliação do potencial natural de erosão da bacia do córrego João Dias, Aquidauana, MS. **In: Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**, 3, 2010, Cáceres. Anais...Cáceres, 2010. Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.666 - 675.
- CHAVES, I. B.; SLACK, D. C.; GUERTIN, D. P.; LOPES, V. L. Estimativa da erodibilidade e sua relação com outros atributos dos solos do Estado da Paraíba. **In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água**, 15, Santa Maria, 2004. Anais...SBCS, Santa Maria, 2004.
- CUTILLAS, P. P.; BARBERÁ, G. G.; GARCÍA, C. C. Evaluación de la erosionabilidad (factor k) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo. **GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica**, n.23, p.71-96, 2019.
- DENARDIN, J. E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. 114f. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1990.
- DIAS, E. R.; SILVA, R. M. Estimativa do risco à erosão do solo no município de Lucena-Paraíba. **Caminhos de Geografia**, v.16, n.54, p.192-204, 2015.
- FARIAS, L. C. DE. **Diagnóstico físico-conservacionista das terras e a percepção comunitária-bacia hidrográfica da barragem Vaca Brava-Areia, PB**. 127f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água. Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2006.
- FRANCISCO, P. R. M. **Classificação e mapeamento das terras para mecanização do Estado da Paraíba utilizando sistemas de informações geográficas**. 122f. Dissertação (Manejo de Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2010.
- FRANCISCO, P. R. M. **Modelo de mapeamento da deterioração do Bioma Caatinga da bacia hidrográfica do Rio Taperoá, PB**. 97f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, 2013.

- FRANCISCO, P. R. M.; CHAVES, I. de B. Modelo para estimativa da vulnerabilidade à desertificação. **Revista Educação Agrícola Superior**, v.32, n.2, p.37-50, 2017.
- FRANCISCO, P. R. M.; CHAVES, I. de B.; MORAES NETO, J. M. DE; LIMA, V. L. A. DE; BARRETO, H. T. S. Erodibilidade dos solos da bacia hidrográfica do alto rio Paraíba. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 6, 2019, Palmas. Anais...Palmas, 2019.
- FRANCISCO, P. R. M.; RIBEIRO, G. DO N.; QUEIROZ, K. B. DE. **Potencial natural de erosão e limite de tolerância de perdas de solo na bacia hidrográfica do Açude do Namorado**. In: TECNO21 Ciência e Desenvolvimento. v.1. (Org). FRANCISCO, P. R. M.; RIBEIRO, G. DO N. Campina Grande: EPTEC, 2021. 74p.
- GOMES, V. DOS S.; DANTAS, W. M.; BARBOSA, M. A. DA S.; VENDRUSCOLO, J.; ABRANTES, E. G. DE; FÉLIX, V. J. DE L. Tolerância à perda de solo para o município de Guarabira-PB. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 35, 2015, Natal. Anais...Natal, 2015.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2009. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 12 março de 2011.
- JARDIM, A. M. DA R. F.; ARAÚJO JÚNIOR, G. DO N.; SILVA, M. J. DA; MORAIS, J. E. F.; THIERES GEORGE FREIRE DA SILVA, T. G. F. DA. Estimativas de perda de solo por erosão hídrica para o município de Serra Talhada, PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v.2, n.3, p.186-193, 2017.
- LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. **Tolerância de perdas de terra para solos do estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agrônomo, 1975. 12p. (Boletim Técnico, 28).
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). **Bragantia**, v.51, p.189-196, 1992.
- MANNIGEL, A. R.; CARVALHO, M. DE P. E.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. DA R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, v.24, n.5, p.1335-1340, 2002.
- MARQUES, J. J. G. S. M.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; SÁ, M. A. C. de. Adequação de métodos indiretos para estimativa da erodibilidade de solos com horizonte B textural no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, n.3, p.447-456, 1997.
- MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3. ed. Londres: Blackwell Science, 2015. 304p.
- NOGUEIRA, F. P. **Uso agrícola sustentado das terras do município de Vera Cruz, SP: proposta metodológica**. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2000.
- OLIVEIRA, F. P. DE. **Determinação da tolerância de perdas por erosão para as principais ordens de solos do Estado da Paraíba**. 89f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônoma). Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2004.
- OLIVEIRA, F. P.; SANTOS, D.; SILVA, I. F.; SILVA, M. L. N. Tolerância de perdas de solo por erosão para o Estado da Paraíba. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.8, n.2, p.60-71, 2008.
- OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: A review. **Catena**, v.100, n.1, p.139-147, 2012.
- PALM, C.; SANCHEZ, P.; AHAMED, S.; AWITI, A. Soils: a contemporary perspective. **Annual Rev. Environ. Resour.**, v.32, p.99-129, 2007.
- PARAÍBA. Governo do Estado - Secretaria de Agricultura e Abastecimento – CEPA-PB. **Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba**. Relatório ZAP-B-D-2146/1. UFPB-EletoConsult Ltda., 1978. 448p.
- PARAÍBA. Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente. Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba, AESA. **PERH-PB: Plano Estadual de Recursos Hídricos: Resumo Executivo & Atlas**. Brasília, DF, 2006. 112p.
- RÖMKENS, M. J. M.; YOUNG, R. A.; POESEN, J. W. A.; MCCOOL, D. K.; EL-SWAIFY, S. A.; BRADFORD, J. M. **Soil erodibility factor (K)**. In: RENARD, K. G. et al. (Eds.) Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Washington: US Department of Agriculture, 1997. p.65-99. (Agriculture Handbook, n. 703).
- SALES, J. F. S. DE. **Estimativa de perdas de solo por erosão em propriedades rurais registradas no cadastro ambiental rural no município de Alagoa Nova-PB**. 44f. Monografia (Graduação em Agronomia). Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2018.
- SANTOS, A. C. dos. **Fertilidade de solo e redistribuição de 137-Cs em função da cobertura vegetal, relevo e classes texturais, em uma microbacia hidrográfica do Estado da Paraíba**. 67f. Tese (Doutorado em Tecnologia Energéticas e Nucleares). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2004.
- SANTOS, T. E. M.; SILVA, D. D.; MONTENEGRO, A. A. A. Temporal variability of soil water content under diferente surface conditions in the semiarid region of the Pernambuco State. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.5, p.1733-1741, 2010.
- SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O.; BALBINOT JÚNIOR, A. A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico aluminico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de Solo e Água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, n.2, p.427-436, 2000.
- SILVA, A. M. da. Potencial natural de erosão no município de Sorocaba, São Paulo, Brasil. **Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil**, v.8, p.5-14, 2008.
- SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; JUNIOR CESAR AVANZI, J. C.; FERREIRA, M. M. Erosividade da chuva e erodibilidade de Cambissolo e Latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.6, p.1811-1820, 2009.
- SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; LIMA, J. M.; FERREIRA, M. M. Avaliação de métodos indiretos de determinação de erodibilidade de latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.6, p.1207-1220, 2000.
- SILVA, M. L. N.; FREITAS, P. L.; BLANCANEUAX, P.; CURTI, N.; LIMA, J. M. Relação entre parâmetros da chuva e perdas de solo e determinação da erodibilidade de um Latossolo Vermelho-Escuro em Goiânia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.131-137, 1997.
- SMITH, R. M.; STAMEY, W. L. How to establish erosion tolerances. **J. Soil Water Conserv.**, v.19, n.3, p.110-111, 1964.
- THOMAZ, E. L. The influence of traditional steep land agricultural practices on runoff and soil loss. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.130, n.1, p.23-30, 2009.
- VALLADARES, G. S.; GOMES, A. S.; TORRESAN, F. E.; RODRIGUES, C. A. G.; GREGO, C. R. Modelo multicritério aditivo na geração de mapas de suscetibilidade à erosão em área rural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.9, p.1376-1383, 2012.
- WEI, H.; ZHAO, W. The optimal estimation method for K value of soil erodibility: A case study in Ansai Watershed. **China Soil and Water Conservation Science**, v.15, p.52-65, 2017.
- WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. W. A soil erodibility monograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.26, n.5, p.189-193, 1971.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion loss: a guide to conservation planning**. U.S. Department Agric. Washington D.C. Handb. No. 537, 1978. 58p.

ZHANG, K. L.; SHU, A. P.; XU, X.; YANG, Q. K.; FOBU, Y. O. Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China. **Journal of Arid Environments**, v.72, n.6, p.1002-1011, 2008.