

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

ALVANIL MIRANDA DE SOUZA

MODELAGEM DA EROSÃO HÍDRICA DO ESTADO DO CEARÁ, BRASIL

Alfenas/MG

2022

ALVANIL MIRANDA DE SOUZA

MODELAGEM DA EROSÃO HÍDRICA DO ESTADO DO CEARÁ, BRASIL

Dissertação de Mestrado apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas/UNIFAL-MG.

Área de concentração: Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Luiz Mincato (UNIFAL-MG)

Alfenas/MG

2022

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Central

Souza, Alvanil Miranda de .

Modelagem da erosão hídrica do Estado do Ceará, Brasil / Alvanil
Miranda de Souza. - Alfenas, MG, 2022.

42 f. : il. -

Orientador(a): Ronaldo Luiz Mincato.

Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal
de Alfenas, Alfenas, MG, 2022.

Bibliografia.

1. EPM. 2. Erosão. 3. Semiárido brasileiro. I. Mincato, Ronaldo Luiz ,
orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

ALVANIL MIRANDA DE SOUZA

"Modelagem da Erosão Hídrica do Estado do Ceará, Brasil"

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciências Ambientais.

Aprovada em: 08 de fevereiro de 2022

Prof. Dr. Ronaldo Luiz Mincato
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Felipe Gomes Rubira
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Joaquim Ernesto Bernardes Ayer
Instituição: Centro Universitário de Paulínia e EMBRAPA Meio Ambiente.



Documento assinado eletronicamente por **Ronaldo Luiz Mincato**, Professor do Magistério Superior, em 08/02/2022, às 16:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Joaquim Ernesto Bernardes Ayer**, Usuário Externo, em 08/02/2022, às 16:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **FELIPE GOMES RUBIRA**, Usuário Externo, em 08/02/2022, às 16:48, conforme horário oficial de Brasília, com https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador.php?acao=documento_imprimir_web&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=747278&intra_sistema=100000100&intra_unidade_atual=220000192&intra_hash=d9... 1/2

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pois sem Ele nada é possível.

Agradeço à minha filha Bruna, pelo incentivo e apoio incondicional, seu carinho e compreensão foram imprescindíveis na minha caminhada acadêmica desde o início.

Agradeço ao professor Ronaldo e ao Guilherme pelo aprendizado e convivência durante estes dois anos.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa de estudos;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

A todos, o meu muito obrigado.

“Difícil de ver. Sempre em movimento o futuro está.”

(Mestre Yoda, 1980)

RESUMO

No Estado do Ceará a erosão hídrica é um grave problema ambiental, mesmo nas regiões do estado com secas severas e com baixo índice de chuvas. O regime hidrológico irregular marcado por precipitações de alta intensidade aliadas às características morfoestruturais e pedológicas e ao uso do solo na região tem intensificado o processo de erosão hídrica. Nesse cenário, estimar as perdas de solo pela modelagem da erosão hídrica do Estado do Ceará é uma alternativa para auxiliar na proposição de políticas públicas que visem a prevenção da erosão e a conservação dos solos. A hipótese desta pesquisa é de que na região do semiárido brasileiro presente no Ceará existem áreas com elevadas perdas de solo, mesmo diante de baixos índices pluviométricos. O Ceará foi escolhido como área de estudo pela escassez de informações relativas à erosão hídrica. Para estimar as perdas de solo foi utilizado o Método de Erosão Potencial (EPM) com auxílio de Sistema de Informações Geográficas e de sensoriamento remoto. As variáveis utilizadas no EPM foram definidas a partir dos fatores climáticos, pedológicos, topográficos, uso e manejo da terra e pelas feições erosivas. A perda de solo média estimada foi de $9,7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e o estudo demonstrou que em 38% do Estado do Ceará houve perda de solo acima dos limites de tolerância de perda de solo. Estes locais estão situados principalmente nas áreas não vegetadas, de cultivos e de pastagens. Os resultados da pesquisa são importantes para identificar áreas prioritárias para adoção de medidas mitigadoras dos processos erosivos e para elaboração de políticas públicas sustentáveis de conservação dos solos e das águas.

Palavras-chave: EPM; Erosão; Semiárido brasileiro.

ABSTRACT

In the State of Ceará, water erosion is a serious environmental problem, even in regions of the state with severe droughts and low rainfall. The irregular hydrological regime marked by high intensity rainfall combined with morphostructural and pedological characteristics and land use in the region has intensified the process of water erosion. In this scenario, estimating soil losses by modeling water erosion in the State of Ceará is an alternative to assist in proposing public policies aimed at preventing erosion and conserving soils. The hypothesis of this research is that in the Brazilian semi-arid region present in Ceará there are areas with high soil losses, even in the face of low rainfall. Ceará was chosen as the study area due to the scarcity of information on water erosion. To estimate soil losses, the Erosion Potential Method (EPM) was used with the aid of a Geographic Information System and remote sensing. The variables used in the EPM were defined based on climatic, pedological, topographic factors, land use and management, and erosive features. The estimated average soil loss was $9.7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ and the study showed that in 38% of the State of Ceará there was soil loss above the soil loss tolerance limits. These sites are located mainly in non-vegetated, crop and pasture areas. The research results are important to identify priority areas for the adoption of measures to mitigate erosion processes and for the elaboration of sustainable public policies for soil and water conservation.

Keywords: EPM; Water Erosion; Brazilian Semiarid.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
2.1	CEARÁ E O SEMIÁRIDO DO NORDESTE BRASILEIRO.....	11
2.2	EROSÃO HÍDRICA.....	14
2.3	MODELAGEM DA EROSÃO HÍDRICA.....	15
2.4	MÉTODO DE EROSÃO POTENCIAL (EPM).....	17
2.5	TOLERÂNCIA DE PERDAS DE SOLO (TPS).....	20
	REFERÊNCIAS	22
	ARTIGO: MODELAGEM DA EROSÃO HÍDRICA DO ESTADO DO CEARÁ, BRASIL.....	28
	INTRODUÇÃO.....	30
	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
	Descrição da área de estudo.....	31
	Modelagem da erosão hídrica.....	35
	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
	CONCLUSÕES.....	40
	AGRADECIMENTOS.....	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

Dentre os problemas de degradação ambiental enfrentados nas últimas décadas, a erosão hídrica está entre os mais graves. A perda de solo em áreas agrícolas é uma ameaça mundial à produção de alimentos e à segurança alimentar e nutricional. O escoamento superficial desagrega principalmente, em um primeiro momento, a parte superficial do solo rica em nutrientes, o que compromete, em longo, prazo a capacidade produtiva para as atividades agrícolas. Isso provoca um aumento no consumo global dos principais nutrientes para fertilização: Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), elevando os custos para conter as perdas de produção. Este escoamento também dificulta a infiltração de água no solo, diminuindo a quantidade de água disponível às plantas (BORRELLI, 2020).

A erosão hídrica no semiárido brasileiro, apesar da região sofrer secas severas, é um processo que está diretamente ligado a morfologia e a fisiologia das bacias hidrográficas. Os solos rasos com baixa permeabilidade e um subsolo derivado do embasamento cristalino, tornam estes solos muito sensíveis à erosão hídrica. Além disso, as perdas de solo são agravadas pela derrubada da vegetação nativa seguida de queimadas, que são práticas geralmente utilizadas para introdução de monoculturas (ALCÂNTARA *et al.*, 2016).

Para atingir a sustentabilidade na utilização dos solos para práticas agrícolas, é necessário a adoção de formas conservacionistas de produção. Para tanto, as informações relativas à quantificação do processo erosivo e suas consequências ambientais e econômicas são essenciais. Na literatura sobre erosão no semiárido brasileiro há poucos dados obtidos em campo e os disponíveis são geralmente conjuntos de dados restritos. Isto, devido às dificuldades pela demanda de largos períodos e os custos elevados para obtenção das taxas de perdas de solos pela erosão hídrica em parcelas experimentais de campo (LIMA, 2013).

Diante das dificuldades para obtenção de dados confiáveis, os modelos empíricos são frequentemente usados para estimar as taxas de perdas de solo. Criados para simular os processos de erosão hídrica de forma satisfatória, estes modelos de previsão são amplamente utilizados em muitos países (GIRMAY; MOGES; MULUNEH, 2020). Dentre os modelos utilizados, o Método de Erosão Potencial (EPM) (GAVRILOVIC, 1962) é amplamente utilizado na avaliação e estimativa das taxas de perdas de solo pela erosão hídrica (OUALLALI *et al.*, 2020). Utilizado na identificação de áreas com alta vulnerabilidade aos processos erosivos, o EPM é um modelo de estimativa das perdas de solo anuais (EFTHIMIOU; LYKOUDEI; KARAVITIS, 2017). Dentre as vantagens da utilização deste modelo empírico de predição da erosão, está a possibilidade de aplicação em Sistema de Informação Geográfica

(SIG) e de dados de sensoriamento remoto (DEILAMI *et al.*, 2012).

Resultados da aplicação do EPM permitem determinar se a área de estudo apresenta produção de sedimentos acima do limite de Tolerância de Perda de Solo (TPS). A TPS é definida como taxa máxima de perdas de solo que ainda permite uma produtividade agrícola economicamente sustentável (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

O semiárido cearense é uma região com ocorrências de severas estiagens e de fortes chuvas em curtos períodos, tornando a região susceptível à ocorrência da erosão hídrica. Além disso, a retirada da vegetação natural para fins agrícolas tem produzido extensas áreas abandonadas com solos degradados, que se apresentam salinizadas e desertificadas (SUASSUNA, 2007).

Neste cenário, a escassez de informações sobre o processo erosivo no semiárido cearense torna a modelagem da erosão hídrica uma notável ferramenta para formação de um banco de dados que possa auxiliar na definição de medidas mitigadoras. O objetivo deste trabalho é estimar as perdas de solo do Estado do Ceará pelo EPM.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CEARÁ E O SEMIÁRIDO DO NORDESTE BRASILEIRO

Situado na Região Nordeste do Brasil, o Estado do Ceará possui 148.826 km², sendo o quarto maior estado, em tamanho no Nordeste e o 17º entre os estados brasileiros. O Ceará é banhado pelo oceano Atlântico com 573 quilômetros de litoral, além disso, faz divisa com os Estados de Pernambuco, Rio Grande do Norte, Paraíba e Piauí. Possui 184 municípios e 20 Microrregiões Administrativas, destacando-se as Regiões Metropolitanas de Fortaleza, com 19 cidades, e do Cariri, com 9 cidades (CEARÁ TRANSPARENTE, 2021).

Um fator natural que tem influência no clima do Nordeste é a proximidade da linha do Equador, cujas baixas latitudes conferem à região temperaturas elevadas (média de 26° C) (SUASSUNA, 2007). O Ceará pertence a região semiárida nordestina, que é caracterizada pela ocorrência do bioma da caatinga e apresenta clima seco e quente, com chuvas concentradas no verão e outono. A região sofre a influência das massas de ar Equatorial Atlântica, Equatorial Continental, Polar e as Tépidas Atlântica e Kalaariana (ou Massas Tropicais, com baixa umidade que determinam climas áridos e semiáridos, com a existência de uma camada de inversão térmica) que interferem na formação do seu clima (SUASSUNA, 2007).

No semiárido chove pouco e as chuvas são mal distribuídas (SILVA *et al.*, 2013). A precipitação no Estado do Ceará sofre influência de alterações em escalas sazonais, interanuais e decadais, influenciada por fatores como Oscilação Sul, Dipolo do Atlântico, ciclo de manchas solares, Oscilação Decadal do Pacífico e o El Niño (FUNCEME, 2020) que interfere principalmente no bloqueio das frentes frias vindas do sul do país, impedindo a instabilidade condicional na região e a formação do dipolo térmico atlântico, caracterizado pelas variações de temperaturas do oceano Atlântico. Estas variações favorecem às chuvas no Nordeste, quando a temperatura do Atlântico Sul está mais elevada do que a do Atlântico Norte. As chuvas no território cearense apresentam irregularidade de maneira interanual e intranual. Dados históricos da intensidade média de precipitação entre 1991 e 2019 demonstram essa variabilidade e o baixo índice pluviométrico. Em 1993, 1998 e 2012 a média anual foi de 400 mm; nos anos de 1991, 1992, 1997, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2005, 2006, 2007, 2008, 2010, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 e 2019 a média anual foi de 600 mm; nos anos de 1994, 1995, 1996, 2004 e 2011 a média anual foi de 900 mm; e somente no ano de 2009 houve um pico de 1200mm (FUNCEME, 2020).

O período mais chuvoso é entre os meses de fevereiro e maio; no mês de março do ano de 2019 ocorreram acumulados de chuva de mais de 100 mm em 24 horas, considerado como um evento pluviométrico extremo (MONTEIRO; ZANELLA, 2019). Estas chuvas intensas causam altas taxas de erosão hídrica por estarem concentradas em um curto período.

O arcabouço geológico do Nordeste é constituído por dois tipos estruturais: o embasamento cristalino, que representa 70% da região semiárida, e as bacias sedimentares. As bacias sedimentares possuem solos geralmente espessos, superiores a 2 m e podem ultrapassar 6 m, com alta capacidade de infiltração, baixo escoamento superficial e boa drenagem natural, enquanto no embasamento cristalino os solos geralmente são rasos, cerca de 0,6 m, apresentando baixa capacidade de infiltração, alto escoamento superficial e reduzida drenagem natural. O relevo é basicamente constituído por depressões interplanálticas transformadas em verdadeiras planícies de erosão, devido à grande extensão dos pediplanos secos bem conservados, mas em processo de erosão.

Os principais tipos de solos do Ceará são: os Neossolos, Argissolos, Luvissolos, Planossolos, Latossolos, Chernossolos, Vertissolos, Cambissolos, Nitossolos e Gleissolos. Os Latossolos são solos minerais geralmente profundos e muito evoluídos. São favoráveis ao uso agrícola devido à boa condição de drenagem e à grande profundidade; contudo são normalmente distróficos e fortemente ácidos, necessitando de fertilização e calagem. Os Argissolos são solos minerais com a principal característica de maior teor de argila no horizonte B, bom potencial agrícola por serem profundos e de boa drenagem; suas limitações estão relacionadas a deficiência de água durante a seca e a susceptibilidade à erosão. Os Nitossolos possuem textura argilosa ou muito argilosa, apresentam estrutura bem desenvolvida, geralmente possuem uma fertilidade natural de média a alta e bem drenados, baixa susceptibilidade à erosão em relevos plano e suave ondulado; sua principal limitação é o elevado déficit hídrico, necessitando de adubação e irrigação no período seco (EMBRAPA, 2018).

Os Luvissolos são solos minerais eutróficos com atividade alta de argila e pedregosidade superficial, ricos em cálcio, magnésio e potássio, possuem alta fertilidade natural. A pouca profundidade, a frequente ocorrência de pedregosidade, o intenso déficit hídrico e a elevada erodibilidade são as limitações ao uso agrícola. Os Planossolos são solos minerais imperfeitamente drenados, de textura arenosa na superfície e média argilosa no horizonte B, muito utilizados na agricultura familiar de subsistência sem irrigação; com drenagem imperfeita e alta erodibilidade sua principal limitação é a elevada dureza, que dificulta o manejo.

Os Cambissolos são solos minerais que vão de fortemente a imperfeitamente drenados com pequena diferença no conteúdo de argila ao longo do perfil; quando situados em planícies estão sujeitos a inundações, o que limita o pleno uso agrícola. Os Vertissolos se caracterizam por apresentarem alta capacidade de contração quando secos resultando em grandes fendas na superfície e estruturas extremamente duras, e de expansão quando úmidos, com drenagem imperfeita e lenta permeabilidade tornando-os muito susceptíveis à erosão; as limitações estão relacionadas às dificuldades de uso, manejo e conservação, a irrigação e a drenagem devem ter rigoroso controle para evitar riscos de salinização (EMBRAPA, 2018; FUNCEME, 2012).

Os Gleissolos são solos minerais hidromórficos de constituição argilo-arenosa, mal drenados; suas limitações ao uso agrícola são devido ao lençol freático raso com risco de alagamentos frequentes, possui também baixa fertilidade natural. Os Chernossolos possuem desenvolvimento fraco, variam de pouco profundos a profundos, com alta atividade de argila e ricos em matéria orgânica, boa permeabilidade e menos susceptíveis à erosão; o manejo adequado implica na adoção de práticas conservacionistas de prevenção à erosão e de preservação da matéria orgânica. A principal classe de solo do Estado do Ceará é o Neossolo com cerca de 30% de ocorrência, são solos minerais com material orgânico pouco espesso, variam de rasos à profundos e de alta a baixa permeabilidade; em áreas planas e com maior fertilidade natural apresentam grande potencial para uso agrícola, já em ambientes declivosos o uso agrícola fica restrito pela dificuldade de mecanização e pela forte susceptibilidade à erosão (EMBRAPA, 2018).

Cada classe de solo apresenta uma resistência específica à erosão, principalmente em função da estrutura, textura, taxa de infiltração, permeabilidade, densidade e porosidade; estas características são essenciais na determinação das potencialidades e limitações de uma região a agricultura (SILVA *et al.*, 2003).

A caatinga é a cobertura vegetal predominante do Estado Ceará, que também conta com a ocorrência de espécies típicas do cerrado (MORO *et al.*, 2015). Na região litorânea, além da caatinga também coexistem espécies florestais, de cerrado e mata atlântica (CASTRO *et al.*, 2012).

O uso e ocupação da terra do semiárido cearense vem substituindo a vegetação natural pelo sistema agropastoril. Extensas áreas abandonadas de solos degradados apresentam como consequências a salinização e a formação de núcleos de desertificação, resultado de ações antrópicas como a irrigação sem sistema de drenagem gerando escoamento superficial, intensificando o transporte de sedimentos com sais para locais não salinizados; a perda de solo e o seu empobrecimento afetam a organização espacial das populações, promove a redução da

produção agrícola colocando em risco a segurança alimentar e a economia das comunidades (CASTRO; SANTOS, 2020).

Das principais atividades econômicas cearenses, os setores de indústria e serviços foram os que mais se destacaram nas últimas duas décadas. O impacto da reestruturação econômica nas atividades agrícolas permitiu a expansão do agronegócio e o turismo é a principal atividade econômica na região litorânea (ALVES; LIMA JÚNIOR; JUSTO, 2020).

Nas regiões semiáridas a paisagem é formada por áreas abertas intercaladas por manchas de plantas perenes. As áreas abertas geralmente são cobertas por cianobactérias, micro fungos, algas, líquens e briófitas (RODRÍGUEZ-CABALLERO et al., 2013). O grande aumento das atividades antrópicas no uso e cobertura do solo, especificamente nas regiões semiáridas, compromete as condições físicas do solo e os processos hidrológicos e sedimentológicos das bacias hidrográficas, tais como retenção de água, escoamento e produção de sedimentos (CHAMIZO *et al.*, 2012). Contudo, há uma escassez de trabalhos de pesquisa no semiárido brasileiro sobre a erosão hídrica. A inconstância e a pouca informação sobre as características de precipitação limitam a melhor compreensão entre os processos de erosividade e de perdas de solos (ALBUQUERQUE et al., 2005; LIMA et al., 2013; WESTER; WASKLEWICZ; STALEY, 2014).

2.2 EROÇÃO HÍDRICA

Todos os sistemas de produção agropecuária têm um recurso em comum: o solo. Até mesmo os sistemas hidropônicos necessitam do solo para a instalação das suas estruturas; nem mesmos os afloramentos rochosos poderiam ser utilizados nestes casos, devido a sua superfície irregular e com localização específica, nem sempre presente nas propriedades. Assim, o solo é o alicerce dos sistemas de produção, além de servir de base para as edificações rurais e urbanas; habitat de diversos organismos e de várias outras funções no ecossistema (PES; GIACOMINI, 2017).

Nos solos brasileiros o principal processo de degradação é a erosão hídrica (DECHEN *et al.*, 2015). A erosão hídrica é um processo físico que modifica o relevo, caracterizada pelo ciclo hidrossedimentológico: desprendimento, transporte e deposição de partículas de solo; a causa principal deste fenômeno são as chuvas, contudo é agravada pelas ações antrópicas. A erosão hídrica é afetada pelos fatores: forma e declividade do relevo, cobertura vegetal, práticas conservacionistas, potencial erosivo da precipitação pluviométrica, escoamento superficial e erodibilidade dos solos (LOPES *et al.*, 2018).

Na erosão hídrica, o impacto das gotas de chuva no solo desagrega partículas que são transportadas pelo escoamento superficial da água e causa a erosão. Com o impacto das gotas de chuva, partículas são lançadas a uma pequena distância e depositadas na superfície do solo, já no escoamento superficial a distância a que são levadas as partículas varia de acordo com o volume de água e sua velocidade (PES; GIACOMINI, 2017).

A erosão hídrica no Brasil, geralmente está associada ao manejo incorreto do solo, sem a utilização de práticas conservacionistas. A retirada de cobertura vegetal deixando o solo exposto é uma condição que leva ao processo erosivo, que remove não só os sedimentos, mas também nutrientes, matéria orgânica e agroquímicos do sistema de produção (BARROS *et al.*, 2018).

A erosão hídrica é classificada em três tipos: erosão laminar, erosão em sulcos e erosão em voçorocas. Na laminar, a desagregação e o transporte superficial de partículas acontecem pela ação de lâminas finas de água. A erosão em sulcos é caracterizada pela formação de sulcos mais profundos, por consequência de uma maior inclinação do terreno e pela concentração preferencial da enxurrada. Já, as voçorocas são formadas por grandes volumes de água que ganham velocidade e desagregam as laterais e o fundo dos sulcos, ou seja, é o aprofundamento dos sulcos (PES; GIACOMINI, 2017).

A gravidade das consequências dos processos erosivos requer que se controle e quantifique as causas deste fenômeno, para que se possa tomar medidas de controle do processo erosivo, como, por exemplo, a recuperação da vegetação nativa. Com vistas a sustentabilidade socioeconômica e ambiental dos sistemas agrícolas, é essencial buscar metodologias de avaliação dos fatores que causam a erosão e de estimativa das perdas de solo. Essa busca tem gerado o desenvolvimento de um grande número de pesquisas (WISCHMEIER; SMITH, 1978; ALEWELL *et al.*, 2019; BORRELLI *et al.*, 2020).

2.3 MODELAGEM DA EROSÃO HÍDRICA

A erosão acelerada do solo, as causas e as consequências socioambientais negativas são tema de estudos pela comunidade científica já a mais de um século. Foram feitos experimentos em laboratório, observações e medições em campo para descrever quantitativa e qualitativamente a erosão do solo. O aumento da quantidade de dados observados e o objetivo de mapear a espacialização da erosão e compreender melhor seus processos, levaram os cientistas a desenvolver equações quantitativas de previsão de erosão com base em fatores como clima, características do solo, vegetação e topografia. A proposta de equações quantitativas de

previsão de erosão, teve início por volta de 1940; desde então vários modelos matemáticos classificados como empíricos, foram desenvolvidos para prever processos em diferentes escalas espaciais e temporais. Atualmente, a utilização de tecnologias geoespaciais como o Sistema de Informação Geográfica (SIG), e o aumento da quantidade de dados ambientais, faz com que os modelos de previsão de erosão sejam essenciais para estratégias de gestão e conservação do solo, além de serem ferramentas importantes no apoio às decisões de políticas públicas (BORRELLI *et al.*, 2021).

Na quantificação das perdas de solo por erosão hídrica, a utilização de métodos indiretos por modelos estatísticos são ferramentas fundamentais para o entendimento e quantificação de perdas do solo ao longo dos anos (JARDIM *et al.*, 2020). Com a modelagem é possível obter informações sobre a erosão, suas tendências e distribuição espacial, além dos modelos de simulação de erosão poderem ser utilizados para avaliar e simular contextos e cenários alternativos de manejo do solo (GANASRI; RAMESH, 2016).

Métodos para determinação da erosão hídrica baseados em parcelas experimentais com coletas contínuas de dados em campo demandam elevados custos e longos períodos e, muitas vezes, são representativas de áreas restritas. Assim, modelos matemáticos de estimativas da erosão com SIG e sensoriamento remoto viabilizam a utilização destes modelos para diagnosticar a distribuição espacial da erosão hídrica, demonstrando os cenários das taxas de erosão (XU; LUO; PENG, 2011; BARROS *et al.*, 2018). Avaliações de erosão por meio de modelagem são importantes para o planejamento de políticas públicas de mitigação da degradação, bem como na criação de estratégias para sustentabilidade do uso e manejo do solo (BESKOW *et al.*, 2009). Os modelos matemáticos de avaliação da erosão mais utilizados estão elencados na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos empíricos de estimativa de perdas de solo.

Sigla	Modelo	Autores
EPM	<i>Erosion Potential Method</i>	Gavrilovic (1962)
USLE	<i>Universal Soil Loss Equation</i>	Wischmeyer; Smith (1978)
WEPP	<i>Water Erosion Prediction Project</i>	Laflen <i>et al.</i> (1991)
RUSLE	<i>Revised Universal Soil Loss Equation</i>	Renard <i>et al.</i> (1997)
EUROSEM	<i>European Soil Erosion Model</i>	Morgan <i>et al.</i> (1998)
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>	Arnold <i>et al.</i> (1998); Neitsch <i>et al.</i> (2005)

Fonte: adaptado de Lense *et al.* (2020).

Os modelos ambientais, por se tratarem de uma simplificação da realidade, estão sujeitos à erros, que devem ser reduzidos a partir de processos consolidados e da aplicação acurada destes, de acordo com as características biofisiográficas de cada local (ALEWELL *et al.*, 2019).

Nas regiões semiáridas as medições da erosão no solo “in situ” são raras e quando existem são apenas poucos conjuntos de dados, isto se deve aos altos custos e ao longo tempo necessário para obtenção de resultados satisfatórios (LIMA *et al.*, 2013). Sobre as condições edafoclimáticas do nordeste brasileiro, há escassez de trabalhos que estimam as perdas de solo (ALBUQUERQUE *et al.*, 2005). Assim, a utilização de modelos que empregam dados baseados em valores tabelados e de simples determinação, como o Método de Erosão Potencial (EPM) (GAVRILOVIC, 1962), é uma alternativa para auxiliar no estabelecimento de estratégias de conservação do solo e das águas.

2.4 MÉTODO DE EROSÃO POTENCIAL (EPM)

Utilizado na identificação de áreas vulneráveis à erosão, o Método de Erosão Potencial (EPM) estima as perdas de solo anuais em escala de bacia hidrográfica. Vastamente aceito, oferece resultados precisos e confiáveis (EFTHIMIOU; LYKOUDI; KARAVITIS, 2017). O EPM foi desenvolvido a partir de trabalho de campo e de experimentos de laboratório para definição de seus parâmetros. Por quarenta anos este modelo foi sendo aprimorado a partir de medições de erosão na bacia hidrográfica do Rio Morava, na Sérvia (DRAGIČEVIĆ *et al.*, 2019). Muito utilizado na ex-Iugoslávia na década de 70, o modelo de previsão de Gavrilovic se estendeu depois em estudos nos Balcãs, Europa Central, Irã, Marrocos e na Grécia (STEFANIDIS; STATHIS, 2018), e mais recentemente estudos feitos no Brasil (TAVARES *et al.*, 2019; LENSE *et al.*, 2019; PINTO *et al.*, 2020).

O baixo custo de aplicação, a possibilidade de implementação com o SIG e a facilidade de obtenção de seus parâmetros são vantagens do método. Modelos como a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) (WISCHMEIER; SMITH, 1978) baseada em parcelas experimentais e a sua versão revisada (RUSLE) (RENARD *et al.*, 1997), a mais utilizada no Brasil e que pode ser implementada a partir de dados secundários (SANTOS *et al.*, 2015), são mais dispendiosos que o EPM que utiliza poucos dados de entrada e é baseado em valores disponíveis, em geral, na literatura (LENSE *et al.*, 2019).

A partir de fatores do clima, da geologia, das propriedades do solo, do relevo, do uso da terra e do grau de erosão da bacia hidrográfica, o EPM é sintetizado pela Equação 1:

$$W_{yr} = \left(\sqrt[2]{\frac{t_0}{10} + 0,1} \right) \cdot H_{yr} \cdot \pi \cdot \sqrt[2]{[Y \cdot X_a \cdot (\varphi + \sqrt[2]{I_{sr}})]^3} \cdot Bd \quad \text{Equação 1}$$

Em que: W_{yr} = perda total de solo, em $Mg \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; t_0 = temperatura média do ar, em $^{\circ}C$; H_{yr} = precipitação pluviométrica anual, em mm; Y = resistência do solo à erosão hídrica, adimensional; X_a = coeficiente de uso e manejo do solo, adimensional; φ = coeficiente do grau das feições erosivas, adimensional; I_{sr} = inclinação média da área, em %; Bd = densidade média dos solos, em $kg \text{ dm}^{-3}$

O clima afeta diretamente a modelagem da erosão a partir dos fatores que promovem a desagregação do solo (WISCHMEIER; SMITH, 1978), estes fatores são a precipitação pluviométrica média (H_{yr}) e a temperatura média do ar (t_0);

Os parâmetros Y e X_a foram adaptados às condições edafoclimáticas tropicais por Sakuno et al. (2020). Anteriormente, estes parâmetros haviam sido estabelecidos para regiões de clima temperado, especialmente, os Balcãs por Gavrilovic (1962). Os valores de (Y) oscilam entre 0,10 e 2,00, e quanto mais próximo de 0,10 maior a resistência do solo a erosão (GAVRILOVIC, 1962) (TABELA 2). O coeficiente (Y) representa a influência dos atributos do solo e de seu material de origem na resistência à erosão hídrica.

Tabela 2 - Coeficiente médio de resistência do solo à erosão hídrica (Y).

Material Parental	Solos Originados (SiBCS ¹)	Y
Afloramentos rochosos	-	0,25
Sedimentos aluviais	Neossolos Flúvicos, Gleissolos, Organossolos, Planossolos	0,50
Rochas básicas e ultrabásicas, Anfibolitos, Argilitos, Xistos	Chernossolos, Latossolos	0,60
	Argissolos, Nitossolos, Plintossolos	0,70
Granitos, Gnaisses e Migmatitos	Argissolos*, Latossolos*, Luvisolos*, Nitossolos*, Planossolos*.	0,80
	Cambissolos Húmicos, Luvisolos*, Plintossolos*.	0,90
	Espodossolos, Vertissolos	1,20
Arenitos quartzosos, Siltitos e Quartzitos	Cambissolos, Neossolos Regolíticos	1,50
	Cambissolos*, Neossolos Litólicos*, Luvisolos*	2,00

Fonte: Sakuno *et al.* (2020). ¹Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos. *Presença de areia quartzosa.

A estrutura oxídica dos Latossolos brasileiros tem influência direta na formação e estabilidade de micro agregados e, conseqüentemente, sobre a estrutura do solo, isto faz com que solos com elevados conteúdos de argila apresentem elevada permeabilidade. Esta especificidade é um exemplo de uma inadequação que ocorre no ajuste do parâmetro Y, devido a não consideração desta característica do solo (NUNES; CASSOL, 2008). Esta é uma das dificuldades na adaptação do coeficiente Y para regiões diferentes daquela observada por Gavrilovic (1962). Isto acontece, pois, vários tipos diferentes de rochas e solos devem ser considerados, para determinar a resistência do solo a erosão (MILEVSKI, 2015).

De acordo com a cobertura vegetal e o manejo adotado, os valores de X_a variam entre 0,05 e 1,00 (Tabela 3). Os menores valores de X_a ocorrem em locais de mata nativa com cobertura vegetal densa, que protege os solos das precipitações pluviométricas; em contrapartida, os maiores valores acontecem nas áreas de baixa cobertura vegetal e com solo exposto. O fator X_a é análogo ao fator (C) de cobertura e manejo do solo da RUSLE (EFTHIMIOU *et al.*, 2016). Dos parâmetros utilizados na estimativa do EPM, o coeficiente de proteção do solo X_a é o que mais influencia as taxas de perdas de solo em relação aos fatores de resistência do solo Y, de erosão observada em campo ϕ , e de declividade média do terreno I_{sr} (DRAGIĆEVIĆ; STEPIĆ, 2006).

Tabela 3 - Valores do coeficiente de uso e manejo do solo (X_a).

Uso e manejo	X_a
Mata	0,05 – 0,30
Pastagem	0,30 – 0,40
Pastagem degradada	0,40 – 0,50
Culturas permanentes com manejo conservacionista	0,50 – 0,60
Culturas permanentes com manejo convencional	0,60 – 0,70
Culturas temporárias com manejo conservacionista	0,70 – 0,80
Culturas temporárias com manejo convencional	0,80 – 0,90
Solo exposto	0,90 – 1,00

Fonte: Adaptado de Gavrilovic (1962) e Sakuno *et al.* (2020).

O coeficiente ϕ mede as feições erosivas de forma qualitativa com valores que variam de 0,10, descrevendo áreas onde ocorre erosão muito fraca, até 1,00, para áreas com erosão severa (Tabela 4). Este coeficiente é definido a partir das feições erosivas observadas na área de estudo (GAVRILOVIC, 1962).

Tabela 4 - Feições erosivas e coeficiente que expressa à erosão observada em campo (φ).

Tipo de erosão	φ
Área com erosão severa (voçoroca, erosão em sulcos muito severa)	1,00
Erosão em sulcos intensa	0,90
Erosão em sulcos média	0,80
Erosão laminar intensa	0,70
Erosão laminar sem sinais visíveis	0,60
Erosão laminar média	0,50
Erosão laminar leve	0,30
Áreas com erosão nas margens dos cursos d'água	0,20
Áreas agrícolas sob erosão não aparente	0,15
Áreas cobertas por vegetação nativa	0,10

Fonte: Adaptado de Gavrilovic (1962) e Spalevic (2011).

Para o cálculo do EPM, além dos fatores tabelados, se utiliza também a declividade do terreno (I_{sr}). Este fator é definido com o auxílio de SIG pelo modelo digital de elevação (MDE). O cálculo é feito pela inclinação média das células do MDE (SILVA; SANTOS; SILVA, 2014).

No modelo EPM, SIG e sensoriamento remoto também são utilizados para representar graficamente a espacialização dos resultados. Desta maneira, os cálculos do modelo e a determinação de seus parâmetros são facilitados e podem ser realizados mesmo em regiões extensas.

2.5 TOLERÂNCIA DE PERDA DE SOLO (TPS)

O conceito de tolerância de perda do solo (TPS) por erosão, com o passar dos anos, foi sofrendo modificações. Smith (1941) foi provavelmente o primeiro estudioso de erosão a estabelecer um conceito para a TPS (BERTOL; ALMEIDA, 2000). Para o autor, a taxa máxima de perda de solo deveria permitir a manutenção da fertilidade do solo ao longo do tempo, contudo, percebeu que o aspecto econômico deveria ser considerado para o estabelecimento do parâmetro (SMITH, 1941). De acordo com Smith e Stamey (1964), a TPS deve subsidiar e promover políticas de preservação e de melhoria do solo, ser compatível com taxas de erosão e

de renovação do solo; específica para cada ambiente; e independente dos agentes causadores da erosão.

Os valores de tolerância de perda do solo podem ser indicativos de sustentabilidade ou não dos solos, estabelecendo limites que levem a escolha das técnicas a serem adotadas (LOMBARDI; BERTONI, 1975). Geralmente solos com pouca profundidade ou com gradiente textural elevado entre os horizontes de superfície e de subsuperfície possuem uma menor tolerância de perda de solo, enquanto os mais profundos e bem drenados apresentam maiores valores de tolerância (DEMARCHI; ZIMBACK, 2014). Em se mantendo a perda de solo dentro do limite de tolerância estimada, que deve ser sempre minimizado, poderá assim ser garantida a manutenção produtiva e a sustentabilidade do solo a longo prazo (BERTOL; ALMEIDA, 2000).

Em estudos no Estado de São Paulo, Lombardi Neto e Bertoni (1975) definiram os limites de TPS entre 4,5 e 13,4 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para Argissolos e 9,6 e 15,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para Latossolos; enquanto na Europa ficam entre 0,3 e 1,4 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, dependendo dos fatores que promovem o desgaste do solo e da sua taxa de formação (VERHEIJEN *et al.*, 2009). Para Wischmeier e Smith (1978), o limite máximo de perda de solo normalmente aceito fica em torno de 11,2 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Todavia, os limites pela TPS acima de 1 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ em solos com taxa de formação muito lenta, pode ser considerada como causadora de danos irreversíveis à qualidade do solo a longo prazo pois não sabemos suas taxas de pedogênese (DI STEFANO; FERRO, 2016). De acordo com a FAO e ITPS, perdas maiores do que a taxa de formação dos solos são insustentáveis a longo prazo, pois as perdas são acumulativas (FAO, 2019).

A metodologia de Bertol e Almeida (2000) é a mais recente e a mais utilizada no Brasil para quantificar a TPS por considerar uma maior variedade de atributos do solo e à facilidade na obtenção dos mesmos (OLIVETTI *et al.*, 2015). Os limites de TPS demonstram uma grande variação entre solos do mesmo tipo; portanto, o uso de um padrão uniforme em terras agrícolas em escala regional, muito comum no Brasil, não demonstra precisão (BERTOL; ALMEIDA, 2000). Assim, é necessária a determinação dos valores de TPS em escala de bacia hidrográfica para que se possa melhorar sua aplicação e confiabilidade (LENSE *et al.*, 2019).

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. W. et al. Determinação de fatores da equação universal de perda de solo em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 2, p. 153–160, 2005.
- ALCÂNTARA, H. M. et al. Uso de prática mecânica de conservação do solo para redução da erosão em microbacias do semiárido. **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL**, 7, 2016, Campina Grande. Instituto brasileiro de Estudos ambientais, 2016, p. 1-5.
- ALEWELL, C. et al. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. **International Soil and Water Conservation Research**, Amsterdã, v. 7, n. 3, p. 203–225, 2019.
- ALVES, D. F.; LIMA JÚNIOR, F. O.; JUSTO, W. R. Mudanças na espacialidade da estrutura produtiva do Ceará: um estudo de suas microrregiões nos anos de 2007 e 2017. **Geosul**, Florianópolis, v. 35, n. 76, p. 398-427, 2020.
- AMORIM, R. S. S. et al. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 6, p. 1046–1049, 2010.
- ARNOLD, J.G. et al. Large-area hydrologic modeling and assessment: part I model development. **Water Resources Association**, Virgínia, v. 34, p. 73-89, 1998.
- AVANZI, J. C. et al. Distribuição espacial do risco de erosão hídrica em uma bacia hidrográfica com eucalipto e mata atlântica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 37, n. 5, p. 427–434, 2013.
- BARROS, E. N. S. et al. Modelagem da erosão hídrica nas bacias hidrográficas dos rios Lontra e Manoel Alves Pequeno, Tocantins. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 13, n. 1, p. 1-9, 2018.
- BERTOL, I; ALMEIDA, J. A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do Estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 657–668, fev./maio 2000.
- BORRELLI, P. et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington DC, v. 117, n. 36, p. 21994–22001, 2020.
- BORRELLI, P. et al. Soil erosion modelling : A global review and statistical analysis. **Science of the Total Environment**. Amsterdã, 780, 146494, 2021.
- BESKOW, S. et al. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, Amsterdã, v. 79, n. 1, p. 49–59, 2009.

- CASTRO, A. S. F.; MORO, M. F.; MENEZES, M. O. T. O complexo vegetacional da Zona Litorânea no Ceará: Pecém, São Gonçalo do Amarante. **Acta Botanica Brasilica**, Feira de Santana, v. 26, n. 1, p. 108–124, 2012.
- CASTRO, F. C.; SANTOS, A. M. DOS. Salinidade do solo e risco de desertificação na região semiárida. **Mercator**, Fortaleza, v. 19, p. 1–13, 2020.
- CONTROLADORIA E OUVIDORIA GERAL DO ESTADO. Plataforma Ceará Transparente. **O estado do Ceará**. 2021. Disponível em: <<https://cearatransparente.ce.gov.br/portal-da-transparencia/paginas/o-estado-do-ceara>>. Acesso em: 23 maio 2021.
- CHAMIZO, S. et al. Runoff at contrasting scales in a semiarid ecosystem: A complex balance between biological soil crust features and rainfall characteristics. **Journal of Hydrology**, Amsterdã, v. 452, p. 130-138, 2012.
- DECHEN, S. C. F. et al. Losses and costs associated with water erosion according to soil cover rate. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 2, p. 224-233, 2015.
- DEILAMI, B. R. et al. Estimation of Erosion and Sedimentation in Karoon Basin using EPM with in Geographic Information System. **Engineering Science and Technology: An International Journal**, Amsterdã, v. 2, n. 5, p. 923–927, 2012.
- DEMARCHI, J. C.; ZIMBACK, C. R. L. Mapeamento, Erodibilidade e tolerância de perda de solo na sub-bacia do Ribeirão das Perobas. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 29, n. 2, p. 102-114, 2014.
- DI STEFANO, C.; FERRO, V. Establishing soil loss tolerance: An overview. **Journal of Agricultural Engineering**, Pavia, v. 47, n. 3, p. 127–133, 2016.
- DRAGIČEVIĆ, N. et al. Effect of source-varying input data on erosion potential model performance. **Geocarto International**, Londres, v. 34, n. 10, p. 1-14, 2019.
- DRAGIČEVIĆ, S.; STEPIC, M. Changes in erosion intensity in Slivuljiga - influence of anthropogenic factor. **Geographical Society**, Kiev, v. 86, n. 2, p. 37-44, 2006.
- DUARTE, C. C. et al. Análise fisiográfica da Bacia Hidrográfica do Rio Tapuracá-PE. **Revista de Geografia**, Recife, v. 24, no 2, p. 50–64, 2007.
- EFTHIMIOU, N. et al. Assessment of soil susceptibility to erosion using the EPM and RUSLE models: The case of Venetikos river catchment. **Global Nest Journal**, Atenas, v. 18, n. 1, p. 164–179, 2016.
- EFTHIMIOU, N.; LYKOUDI, E.; KARAVITIS, C. Comparative analysis of sediment yield estimations using different empirical soil erosion models. **Hydrological Sciences Journal**, Florida, v. 62, n. 16, p. 1-21, 2017.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS**. Embrapa Solos 2018, Brasília - DF. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>. Acesso em 14 de maio de 2021.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Diretrizes voluntárias para a gestão sustentável dos solos**. Roma, p. 16, 2019.

FUNCEME, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos - Mesorregião do Sul Cearense**. Fortaleza: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2012.

FUNCEME, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Calendário das Chuvas no Estado do Ceará**. Fortaleza: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2020.

GANASRI, B. P.; RAMESH, H. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. **Geoscience Frontiers**, Amsterdã, v. 7, n. 6, p. 953–961, 2016.

GAVRILOVIC, S. A. A method for estimating the average annual quantity of sediments according to the potency of erosion. **Bulletin of the Faculty of Forestry**, Belgrado, v. 26, p.151-168, 1962.

GIRMAY, G.; MOGES, A.; MULUNEH, A. Estimation of soil loss rate using the USLE model for Agew mariyam Watershed, northern Ethiopia. **Agriculture and Food Security**, Berlin, v. 9, n. 1, p. 1–12, 2020.

JARDIM, A. M. R. F. et al. Modelagem da perda de solo por erosão hídrica em Planossolo Háplico. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 2, p. 6826–6834, 2020.

LAFLEN, J. M. et al. A new generation of erosion prediction technology. **Journal of Soil and Water Conservation**, Kansas, v. 46, n. 1, p. 34-38, 1991.

LENSE, G. H. E. et al. Estimates of soil losses by the erosion potential method in tropical latosols. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 43, p. 1-10 2019.

LIMA, C. A. et al. Characteristics of rainfall and erosion under natural conditions of land use in semiarid regions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 11, p. 1222–1229, 2013.

LIMA, É. R. et al. Perfil dos agricultores familiares da agrovila canudos, Ceará-Mirim/RN, e aceitação do *Carthamus tinctorius* L. – oleaginosa promissora para biodiesel. **Nature and Conservation**, Sofia, v. 12, n. 3, p. 17–24, 2019.

LIMA, R. V.; GAMARRA-ROJAS, G. Camponeses e a Mandalla no semiárido Brasileiro: reflexões sobre sustentabilidade com base em um estudo de caso com abordagem agroecossistêmica. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 161–195, 2017.

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. Tolerância de perdas de terras para solos do Estado de São Paulo. **Instituto Agrônomo de Campinas**, Campinas, v. 28, p. 12, 1975.

- LOPES, L. M. et al. estudo comparativo de erodibilidade de solos do semiárido Cearense por métodos indiretos. **In: XIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos e Partículas nas Américas**, Vitória, n. 85, p. 1–7, 2018.
- MONTEIRO, J. B.; ZANELLA, M. E. Eventos extremos no estado do Ceará, Brasil: uma análise estatística de episódios pluviométricos no mês de março de 2019. **GeoTextos**, Salvador, v. 15, n. 2, p. 149–173, 2019.
- MORGAN, R. P. C. et al. The EUROSEM model. **Springer Verlag**, Berlim, p. 373 - 382, 1998.
- MORO, M. F. et al. Vegetação, unidades fitoecológicas e diversidade paisagística do estado do Ceará. **Rodriguésia**, Rio de Janeiro, v. 66, n. 3, p. 717-43, 2015.
- MILEVSKI, I. I. S. C. An approach of GIS based assessment of soil erosion rate on country level in the case of Macedonia. **Geobalcanica**, Escócia, p. 97–104, 2015.
- NEITSCH, S. L. et al. **SWAT User Manual, Version**. Grassland Soil and Water Research Laboratory, Temple, Texas, USA, 2005. 472p.
- NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2839–2845, 2008.
- OUALLALI, A. et al. Sediment mobilization study on Cretaceous, Tertiary and Quaternary lithological formations of an external Rif catchment, Morocco. **Hydrological Sciences Journal**, Washington, v. 65, n. 9, p. 1568–1582, 2020.
- OLIVETTI, D. et al. Spatial and temporal modeling of water erosion in dystrophic red latosol (Oxisol) used for farming and cattle raising activities in a sub-basin in the south of Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 39, n. 1, p. 58–69, 2015.
- PES, L. Z.; GIACOMINI, D. A. **Conservação do Solo**. Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2017.
- PINTO, G. S. et al. Estimativa das perdas de solo por erosão hídrica utilizando o Método de Erosão Potencial. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 39, p. 62–71, 2020.
- RENARD, K. G. et al. **Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook, Washington, v. 703, 1997.
- RIBEIRO FILHO, J. C. et al. Raifall characterization and sedimentological responses of watersheds with diferemt land uses to precipitation in the semiarid region Brazil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 2, p. 468–478, 2017.
- RODRÍGUEZ-CABALLERO, E. et al. Soil Loss and Runoff in Semiarid Ecosystems: A Complex Interaction Between Biological Soil Crusts, Micro-topography, and Hydrological Drivers. **Ecosystems**, Berlim, v. 16, n. 4, p. 529–546, 2013.

- SAKUNO, N. R. R. et al. Adaptation and application of the erosion potential method for tropical soils. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 51, n. 1, e20186545, 2020
- SANTOS, D. B. O.; BLANCO, C. J. C.; PESSOA, F. C. L. RUSLE para determinação da Tolerância de Perda de Solo. **Biota Amazônia**, Macapá, v. 5, n. 4, p. 78–83, 2015.
- SANTOS, L. O.; CAMPOS, K. C. Modernização da agropecuária dos municípios do Estado do Ceará. **Economia & Região**, Londrina, v. 9, n. 2, p. 115, 2021.
- SILVA, A., SCHULZ, H. E., CAMARGO, P. B. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias hidrográficas**. São Carlos - SP: Rima Editora, 2003.
- SILVA, D. F. et al. Previsão Climática e de Ciclos Climáticos para o Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 06, n. 2013, p. 1275–1291, 2011.
- SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, A. M. Predicting soil erosion and sediment yield in the Tapacurá catchment, Brazil. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, João Pessoa, v. 8, n. 1, p. 75–82, 2014.
- SMITH, D. D.; WHITT, D. M; SMITH, D. D. Interpretation of soil conservation data for field use. **Agricultural Engineering**, Washington, v. 22, p. 173-175, 1941.
- SOUSA, F. R. C.; PAULA, D. P. Análise de perda do solo por erosão na Bacia Hidrográfica do Rio Coreaú (Ceará-Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v. 20, n. 3, 2019.
- STAMEY, W.L.; SMITH, R. M. A conservation definition of erosion tolerance. **Soil Science**, Washington, v. 97, n. 3, p. 183-186, 1964.
- STEIN, D. P.; PONÇANO, W. L.; SAAD, A. R. Erosão na bacia do rio Santo Anastácio, Oeste do Estado de São Paulo, Brasil. **Geociências**, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 143–162, 2003.
- STEFANIDIS, S.; STATHIS, D. Effect of climate change on soil erosion in a Mountainous Mediterranean Catchment (Central Pindus, Greece). **Water**, Basel, v. 10, n. 10, 2018.
- SUASSUNA, J. Semi-Árido: proposta de convivência com a seca. **Fundação Joaquim Nabuco**, Recife, v. 23, n. 1-2, p. 135-148, 2007.
- TAVARES, A. S. et al. Modeling of water erosion by the erosion potential method in a pilot subbasin in southern Minas Gerais. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 40, n. 2, p. 555–572, 2019.
- VERHEIJEN, F. G. A. et al. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. **Earth-Science Reviews**, Amsterdã, v. 94, n. 4, p. 23–38, 2009.
- VITAL, S. R. O.; GIRÃO, O. Análise da suscetibilidade da paisagem à erosão na bacia do alto curso do rio Taperoá (PB). **Revista OKARA: Geografia em debate**, João Pessoa, v. 9, p. 4-25, 2015.

WESTER, T.; WASKLEWICZ, T.; STALEY, D. Functional and structural connectivity within a recently burned drainage basin. **Geomorphology**, Amsterdã, v. 206, p. 362–373, 2014.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Supersedes Agriculture Handbook. Washington, United States Department of Agriculture, 1978. 67 p.

XU, Y.; LUO, D.; PENG, J. Land use change and soil erosion in the Maotiao River watershed of Guizhou Province. **Journal of Geographical Sciences**, Berlim, v. 21, n. 6, p. 1138–1152, 2011.

ARTIGO:**MODELAGEM DA EROSÃO HÍDRICA DO ESTADO DO CEARÁ, BRASIL****RESUMO**

O semiárido brasileiro devido à baixa taxa pluviométrica anual média pode causar a falsa impressão de que as perdas de solos por erosão hídrica não acontecem ou que seriam irrelevantes. Ao contrário, as perdas de solo por erosão são elevadas e podem comprometer a sustentabilidade da região. Assim, estimar as perdas de solo por modelagem é uma alternativa para compreensão dos processos erosivos, bem como para elaborar políticas de planejamento do uso e ocupação do solo que promovam a sustentabilidade socioeconômica e ambiental regional. A hipótese desta pesquisa é de que no semiárido brasileiro há áreas com elevadas perdas de solo, mesmo com os baixos índices pluviométricos. A área de estudo corresponde ao Estado do Ceará com 148.826 km². As perdas de solo foram estimadas pelo Método de Erosão Potencial com auxílio de técnicas de sensoriamento remoto e de sistema de informações geográfica. O estudo apontou uma taxa de perda de solo média de 9,7 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, com 38% da área do Ceará com erosão hídrica acima dos limites de tolerância de perdas de solo. Tais perdas estão localizadas principalmente em áreas não vegetadas e de cultivos agrícolas e de pastagens. Os resultados demonstram que mesmo no semiárido cearense, uma região com seca severa e relativo baixo nível de chuvas, podem haver elevadas taxas de perdas de solos, principalmente devido às características edafoclimáticas da região aliadas ao uso e as práticas de manejo inadequadas.

Palavras-chave: Conservação do solo, EPM, Perdas de solo.

ABSTRACT

The Brazilian semi-arid region, due to the low average annual rainfall, can give the false impression that soil losses due to water erosion do not occur or that they would be irrelevant. On the contrary, soil losses through erosion are high and can compromise the sustainability of the region. Thus, estimating soil losses by modeling is an alternative for understanding erosion processes, as well as for developing land use and occupation planning policies that promote regional socioeconomic and environmental sustainability. The hypothesis of this research is that in the Brazilian semiarid there are areas with high soil losses, even with low rainfall. The study area corresponds to the State of Ceará with 148,826 km². Soil losses were estimated by the Potential Erosion Method with the aid of remote sensing techniques and a geographic information system. The study showed an average soil loss rate of 9.7 Mg ha⁻¹ year⁻¹, with 38% of the Ceará area with water erosion above the soil loss tolerance limits. Such losses are located mainly in non-vegetated areas and in agricultural and pasture crops. The results demonstrate that even in the semi-arid region of Ceará, a region with severe drought and relatively low rainfall, there can be high rates of soil loss, mainly due to the edaphoclimatic characteristics of the region combined with inadequate use and management practices.

Key words: Soil conservation, EPM, Soil losses.

INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural essencial à vida e aos ecossistemas terrestres. Ele é fundamental para a produção de alimentos, serve de base para as edificações rurais e urbanas, é o habitat de diversos organismos, além de várias funções ambientais e ecossistêmicas (PES; GIACOMINI, 2017). Porém, estas funções podem ser comprometidas pela degradação dos solos devido à erosão hídrica em regiões tropicais e equatoriais (BERTOL; CASSOL; BARBOSA, 2019). A erosão do solo é um processo natural e lento, que em um ambiente ecologicamente equilibrado é um agente transformador da paisagem. A exposição do solo pela ação antrópica intensifica a erosão hídrica, leva a sua rápida degradação e pode causar consequências graves que demandaram um período superior a taxa de formação dos solos para a sua recuperação (CARNEIRO *et al.*, 2014).

As perdas de solo por erosão afetam toda a sociedade, principalmente o produtor rural, causando um prejuízo contínuo e acumulativo que afeta a economia e a paisagem (SOBRINHO, 2015). Por exemplo, os altos custos envolvidos na mitigação das perdas de nutrientes e a diminuição da capacidade produtiva pela redução da retenção de água do solo (MARQUES, 2019). A perda de insumos aplicados no solo para produção agrícola, consequência do escoamento superficial da água das chuvas, bem como os danos adversos da erosão, podem causar danos financeiros aos produtores agrícolas e a sociedade em geral. Os custos de perda de nutrientes causados pela erosão em lavouras temporárias no Brasil atingem 1,3 bilhão de dólares ao ano (DECHEN *et al.*, 2015).

O semiárido cearense mesmo sendo uma região de seca, sofre com perdas de solo. Segundo Sousa e Paula (2019), o regime hidrológico irregular marcado por precipitações de alta intensidade aliadas às características morfoestruturais e pedológicas da região, tem intensificado o processo de erosão hídrica.

Dessa forma, há uma escassez de pesquisas nessa região a respeito da relação entre os baixos índices pluviométricos e as taxas de perdas de solo por erosão hídrica, bem como dos efeitos das dinâmicas do uso do solo sobre os processos hidrológicos e sedimentológicos, que tem como consequências graves o assoreamento e a eutrofização de corpos d'água (ALBUQUERQUE *et al.*, 2005). Além disso, a pouca informação disponível sobre as características de precipitação no semiárido brasileiro limitam uma melhor compreensão da relação dos processos de erosividade e perda de solo (ALBUQUERQUE *et al.*, 2005; LIMA *et al.*, 2013; WESTER; WASKLEWICZ; STALEY, 2014).

Avaliar a erosão hídrica “in situ” envolve custos elevados e exige um longo tempo para obtenção dos resultados (LIMA *et al.*, 2013). Como alternativa para estas dificuldades, são utilizados modelos de estimativa de perda de solo, dentre os quais podemos citar o Método de Erosão Potencial (EPM) (GAVRILOVIC, 1962). Amplamente utilizado no Norte da África, Oriente Médio e Europa Central e Oriental e no Brasil (TAVARES *et al.*, 2019). O método oferece resultados precisos e confiáveis. Possui também um baixo custo na sua aplicação, aliado a fácil implementação em sistema de informação geográfica (EFTHIMIOU; LYKOUDI; KARAVITIS, 2017).

A hipótese desta pesquisa é de que na região do semiárido brasileiro, presente no Estado do Ceará, existem áreas com altas perdas de solo, mesmo diante de baixos índices pluviométricos. Desta maneira, utilizar o EPM para estimar as perdas de solo é uma alternativa para compreensão dos processos erosivos, bem como para ilustrar a importância da conservação do solo e destacar as áreas críticas para recuperação e manutenção dos recursos pedológicos. Além disso, a produção de uma base de dados a respeito das taxas de erosão hídrica no Ceará pode auxiliar no planejamento de medidas mitigadoras do processo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo compreende o Estado do Ceará, que cobre 148.826 km² localizados no Nordeste do Brasil (Figura 1). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população estimada do Ceará em 2020 era de 9.187.103 habitantes, desse total cerca de 75% residentes na área urbana. No estado, o Índice de Desenvolvimento Humano era de 0,682 em 2010, com uma renda per capita familiar de R\$ 1.028,00 (IBGE, 2020).

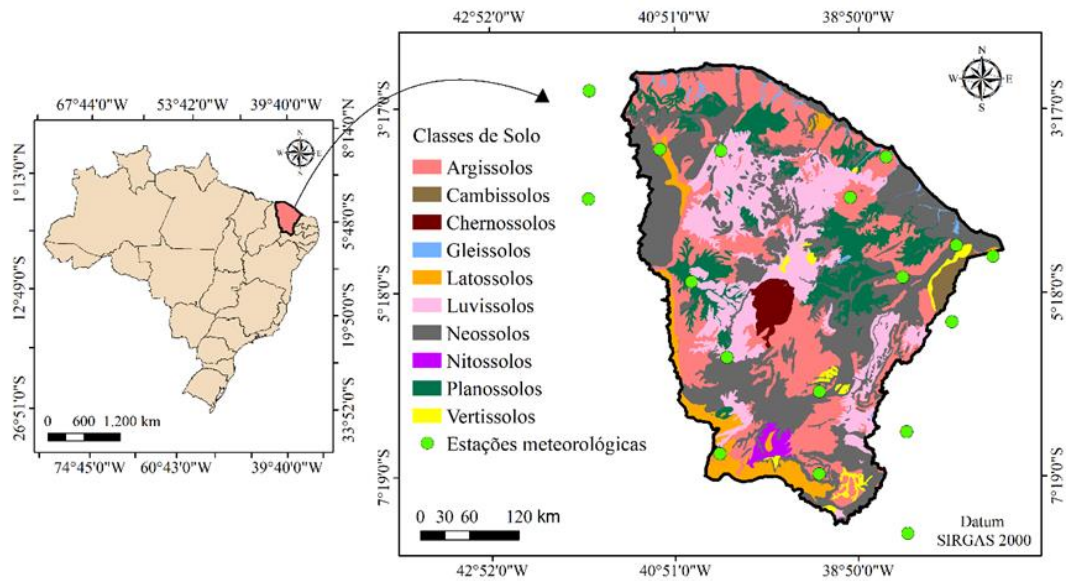


Figura 1 –Localização e mapa digital de solos do Estado do Ceará, Brasil. Fonte: EMBRAPA (2017).

As principais classes de solo do Ceará estão listadas na Tabela 2. Os solos das regiões semiáridas em sua maioria são pobres em matéria orgânica, pedregosos, pouco profundos e com baixa capacidade de retenção de água, o que diminui sua estabilidade e torna a região mais suscetível à erosão (RIBEIRO FILHO *et al.*, 2017). O mapa digital de solos, ilustrado na figura 1, foi obtido com base na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (2017) (Escala 1:6.000.000).

Tabela 2 - Classes de solo, valores do coeficiente de resistência do solo à erosão hídrica (Y), densidade do solo (Bd) e tolerância de perda de solo (TPS) do Estado do Ceará, Brasil.

Classes de solo	Área %	Y adm.	Bd kg dm ⁻³	TPS Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹
Neossolos	30,96	1,4	1,43	4,86
Argissolos	28,75	0,9	1,46	5,70
Luvissolos	17,98	0,9	1,35	5,90
Planossolos	11,93	0,9	1,65	5,06
Latossolos	4,83	0,8	1,45	8,41
Chernossolos	1,75	0,6	1,27	4,45
Vertissolos	1,09	1,2	1,31	8,23
Cambissolos	1,02	1,0	1,35	7,56
Nitossolos	0,87	0,8	1,29	6,80
Gleissolos	0,82	0,5	1,28	7,17

Segundo a classificação climática de Köppen, o Ceará possui três tipos de clima: clima tropical de savana (Aw) com inverno seco em 63,7% do território, ocorrendo na faixa litorânea

e em grande parte da região sul e leste; clima semiárido quente (Bsh) no centro oeste do estado e presente em 36% do território cearense, e clima árido quente (Bwh) em menor proporção (0,3%) (ALVARES *et al.*, 2013; MUNIZ *et al.*, 2017).

A distribuição espacial das chuvas e da temperatura média do ar no Ceará (Figura 2) foi realizada com base na rede de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (Figura 1). Os dados climáticos de 17 estações meteorológicas foram interpolados pelo método de krigagem ordinária, com ajuste do modelo esférico, usando a ferramenta Geostatistical Wizard do software ArcGIS 10.5 (ESRI, 2016). A precipitação média total anual para o ano de 2020 em todo o Ceará foi 912 mm, e a temperatura média anual foi 26,45° C.

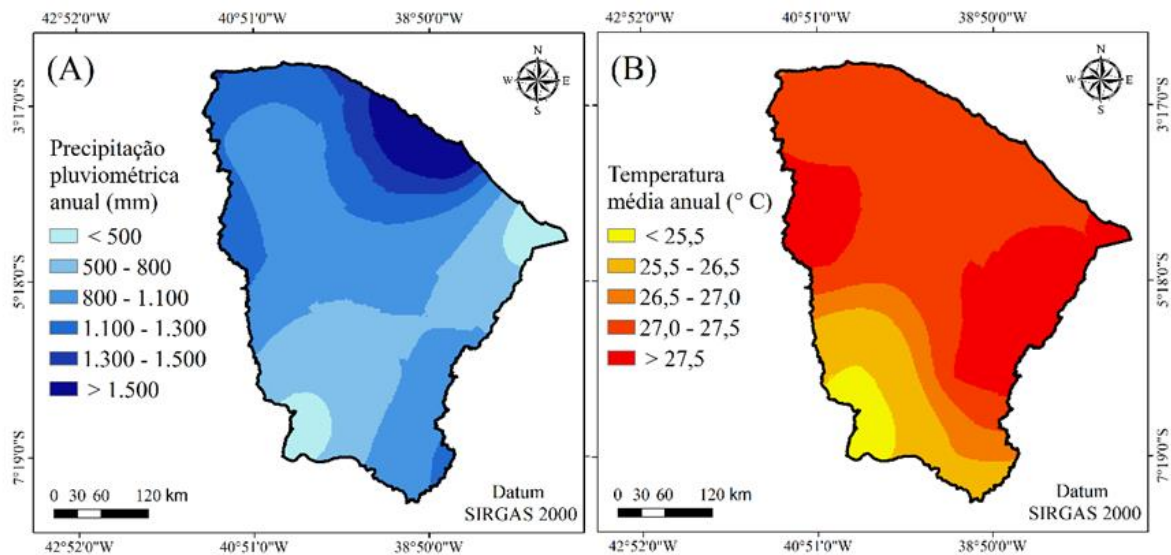


Figura 2 – Precipitação pluviométrica anual (A) e temperatura média anual (B) do Estado do Ceará, Brasil.

A precipitação no Estado do Ceará recebe influência das alterações em escalas sazonais, interanuais e decadais, influenciada por fatores como El Niño Oscilação Sul, Dipolo do Atlântico, ciclo de manchas solares e Oscilação Decadal do Pacífico (SILVA *et al.*, 2013). Tais eventos atmosféricos podem causar níveis de pluviosidade extrema em determinados períodos do ano, como por exemplo, as fortes chuvas em Março de 2009 com ocorrência de mais de 100 mm em 24 horas, seguido de grande seca nos anos seguintes (MONTEIRO; ZANELLA, 2019).

As classes de uso da terra no Ceará são predominantemente Caatinga/Cerrado e cultivos temporários (Figura 3). O mapa de uso da terra foi obtido a partir da Coleção 5 de 2019 do Projeto MapBiomias (2019). As coberturas compostas por Caatinga e Cerrado foram

representadas em uma única classe devido à dificuldade de diferenciar estes biomas a partir de imagens de satélite utilizadas.

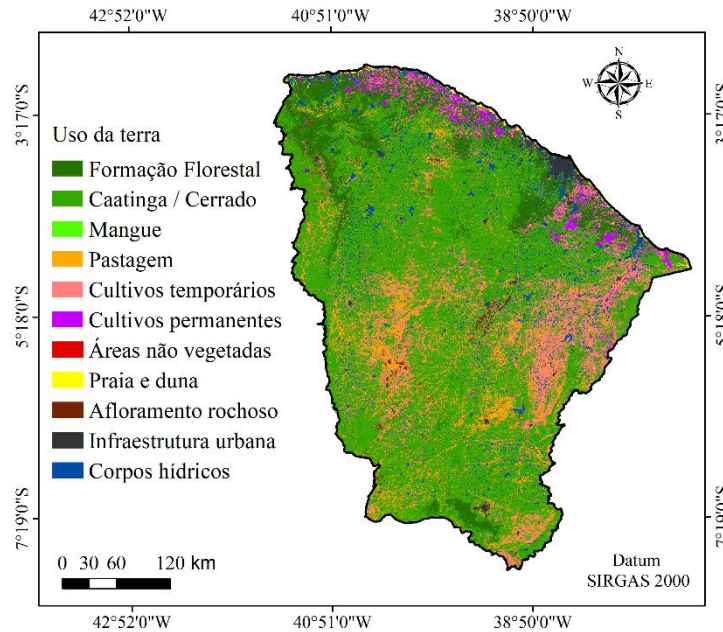


Figura 3 – Uso da Terra do Estado do Ceará, Brasil.

A altimetria (Figura 4A) foi obtida do modelo digital de elevação do Brasil, disponível na plataforma digital Brasil em Relevo (MIRANDA, 2005). A partir da altimetria foi elaborado o mapa de declividade (Figura 4B) com a ferramenta Slope do ArcGIS 10.5 (ESRI, 2016). A altitude média é de 293 m e a máxima de 1.154 m no Pico da Serra Branca no Município Monsenhor Tabosa. No Ceará predominam as classes de relevo plano (0 - 3%) e suave ondulados (3 - 8%) (Figura 4B).

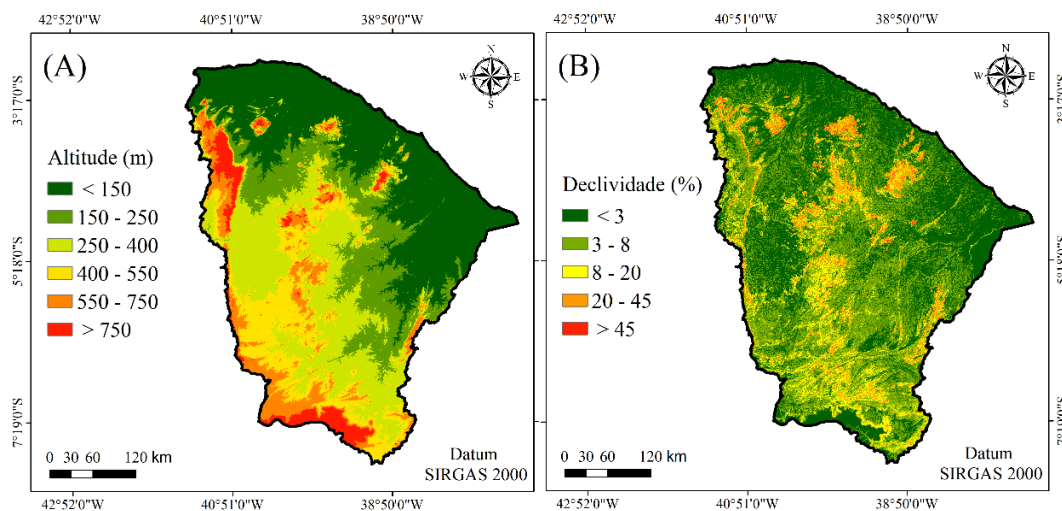


Figura 4 – Modelo digital de elevação (A) e declividade (B) do Estado do Ceará, Brasil.

Modelagem da erosão hídrica

O EPM estima as perdas de solo conforme Equação 1:

$$W_{yr} = \left(\sqrt[2]{\frac{t_0}{10}} + 0,1 \right) \cdot H_{yr} \cdot \pi \cdot \sqrt[2]{\left[Y \cdot X_a \cdot (\varphi + \sqrt[2]{I_{sr}}) \right]^3} \cdot Bd \quad \text{Equação 1}$$

Em que: W_{yr} = perda de solo, em Mg ha⁻¹ ano⁻¹; t_0 = temperatura média do ar, em °C; H_{yr} = precipitação pluviométrica anual, em mm; Y = resistência do solo à erosão hídrica, adimensional; X_a = coeficiente de uso e manejo do solo, adimensional; φ = coeficiente do grau das feições erosivas, adimensional; I_{sr} = inclinação média da área, em %; Bd = densidade média dos solos, em kg dm⁻³

Os fatores climáticos utilizados no cálculo do EPM foram a precipitação pluviométrica anual (H_{yr}) e a temperatura média do ar (t_0) (Figura 2).

O parâmetro Y demonstra a resistência à erosão hídrica conforme cada tipo de solo variando seus valores entre 0,25 e 2,00, sendo que as áreas com maiores valores apresentam menor resistência à erosão. O parâmetro Y foi determinado para cada tipo de solo do Estado do Ceará (Tabela 2) conforme Sakuno *et al.* (2020).

O coeficiente de uso e manejo do solo (X_a) demonstra o papel da vegetação na proteção contra o impacto da precipitação e o escoamento superficial. Os valores variam de 0,05, em áreas com vegetação densa, a 1,00, para áreas com solo exposto (GAVRILOVIC, 1962). O parâmetro X_a foi determinado para cada classe de uso da terra (Tabela 3) a partir de valores tabelados que inicialmente foram propostos por Gavrilovic (1962) e adaptados às condições edafoclimáticas tropicais por Sakuno *et al.* (2020).

Tabela 3 – Uso da terra e valores do coeficiente de uso e manejo do solo (X_a) e coeficiente do grau das feições erosivas (φ) no Estado do Ceará, Brasil.

Uso da Terra	Área (%)	Fator X_a (adm.)	Fator φ^{**} (adm.)
Formação florestal	11,18	0,05	0,1
Cerrado/Caatinga	59,56	0,30	0,2
Pastagens	10,68	0,50	0,5
Cultivos temporários	14,70	0,80	0,6
Cultivos permanentes	1,83	0,60	0,5
Áreas não vegetadas	0,01	1,00	0,7
Mangue*	0,15	-	-
Afloramento rochoso*	0,05	-	-
Praia e duna*	0,36	-	-
Infraestrutura urbana*	0,64	-	-

Corpos Hídricos*	0,84	-	-
------------------	------	---	---

**Valores adaptados de Lense *et al.* (2020). *Áreas não consideradas no cálculo de perdas de solo. Notas: adm. = adimensional.

Estimar as perdas de solo em áreas extensas como o Ceará, inviabiliza a identificação das feições erosivas *in situ*, portanto, o fator ϕ foi classificado de acordo com o uso da terra, tendo como referência valores relatados na literatura especializada (Tabela 3). O fator ϕ indica as feições erosivas predominantes em cada área. Para cada feição erosiva apresentada, o parâmetro recebe um valor tabelado, entre 0,10, para áreas sem sinais de ocorrência de erosão, e 1,00, para aquelas com feições erosivas severas.

O fator I_{sr} representa a declividade da área (Figura 4B) e a influência do relevo no processo erosivo. As densidades dos solos do Estado do Ceará (Bd) estão listadas na Tabela 2. Esse parâmetro foi obtido com base em levantamentos dos solos do Ceará realizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, 2012).

O cálculo da estimativa de perdas de solo e a representação espacial dos resultados foram feitos utilizando álgebra de mapas no SIG ArcGIS 10.5 (ESRI, 2016) via ferramenta Raster Calculator.

Os resultados de perda de solo foram comparados com os limites de tolerância de perdas de solo (TPS) (tabela 2). A TPS pode ser determinada como sendo a intensidade máxima de erosão do solo que ainda permite uma produtividade economicamente sustentável dos cultivos (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

A TPS foi determinada para os solos do Estado do Ceará de acordo com a metodologia proposta por Bertol e Almeida (2000) e as informações utilizadas para este cálculo estão disponíveis no Sistema de Informação de Solos Brasileiros (SISolos), que consiste em um banco de dados com diversos atributos de solos de todas as regiões do Brasil (EMBRAPA, 2014). Os valores de TPS para os solos do estado do Ceará estão representados na tabela 2.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Ceará apresenta taxa média de perda de solo de $9,7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ com uma perda total de cerca de 144 milhões de toneladas de solo por ano. Considerando as classes de uso da terra, as maiores taxas de perdas de solos foram observadas nas áreas não vegetadas ($57,97 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), nos cultivos temporários ($30,57 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), nos cultivos permanentes ($23,50 \text{ Mg ha}^{-1}$

¹ ano⁻¹) e nas pastagens (14,46 Mg ha⁻¹ ano⁻¹). Para as áreas de formação florestal e cerrado foram estimadas taxas de perdas de solo de 2,00 e 4,9 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente.

A distribuição espacial das taxas de perdas de solo no Estado do Ceará está ilustrada na Figura 5.

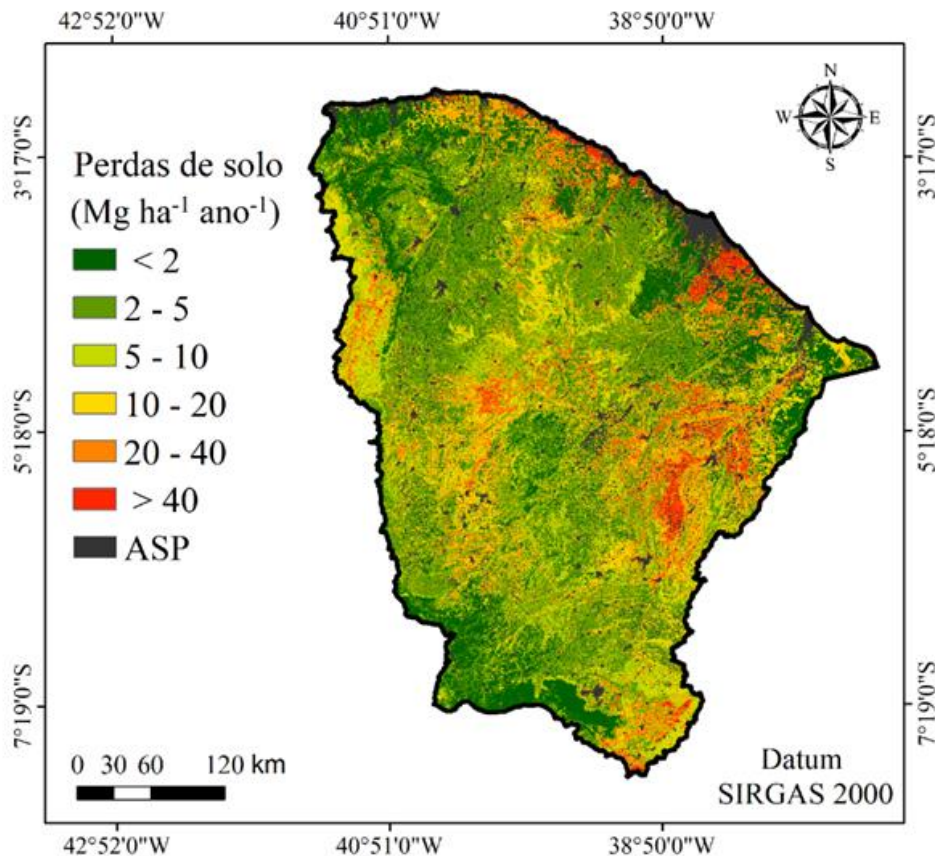


Figura 5 - Distribuição espacial das perdas de Solo no Estado do Ceará, Brasil. Notas: ASP = áreas não consideradas no cálculo de perdas de solo.

Conforme esperado, nas áreas do estado com vegetação nativa, composta por formação florestal, caatinga e cerrado, as taxas de perdas de solo foram menores devido à maior proteção do solo pelo dossel da cobertura vegetal dessas classes de uso, que demonstra a importância da preservação e conservação destas áreas. Áreas com uso e manejo inadequado do solo, de pastagens e que tiveram a vegetação nativa removida contribuem para a intensificação da erosão hídrica. Ao comparar a espacialização das perdas de solo com os valores de TPS (Tabela 2), em 38% do Estado do Ceará as perdas de solo estão acima da TPS (Figura 6).

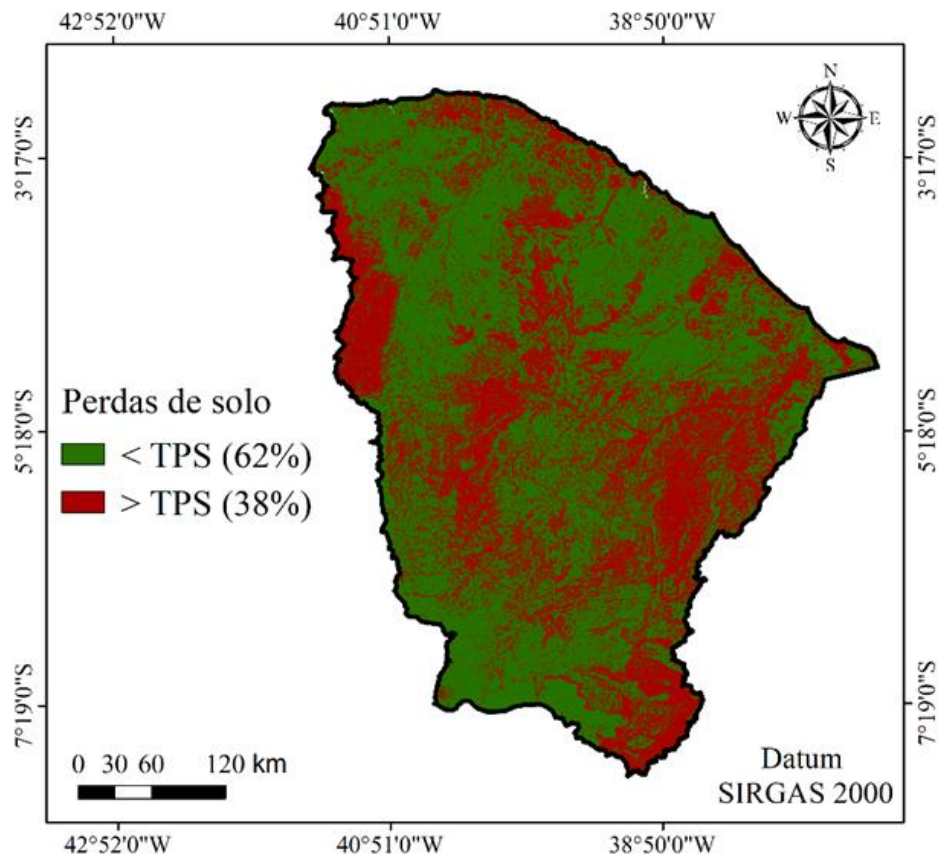


Figura 6 – Áreas do Estado do Ceará, Brasil, com perdas de solo abaixo e acima dos limites de Tolerância de Perda de Solo (TPS).

As áreas com perdas de solo acima da TPS estão distribuídas por todo o estado (Figura 6), que é uma evidência da necessidade de um amplo planejamento de conservação dos solos. Estas áreas são prioritárias para o controle da erosão, visto que reduzir as perdas de solo à níveis sustentáveis é imprescindível, pois o solo é um recurso não renovável na escala de tempo humano (BERTOL; CASSOL; BARBOSA, 2019).

A distribuição da precipitação pluviométrica no Estado do Ceará (Figura 2A), permite identificar em duas regiões distintas: o litoral com maior índice de chuvas e a região semiárida com baixos índices de chuva. Ao comparar as perdas de solo (Figuras 5) com o a precipitação pluviométrica (Figura 2A), em ambas as regiões ocorrem áreas de elevadas taxas de erosão, com perdas de solo acima dos limites da TPS, o que pode ser atribuído principalmente ao manejo inadequado somado as características dos solos das regiões semiáridas, como o baixo teor de matéria orgânica, a baixa retenção de água e a fraca estabilidade, que os torna altamente suscetíveis à erosão (RIBEIRO FILHO *et al.*, 2017).

Apesar de compreender uma região de secas severas, a erosão hídrica e a consequente degradação dos solos são um fenômeno comum no Ceará. A morfologia característica do semiárido brasileiro faz com que a região seja sensível aos processos erosivos; com clima seco e solos rasos e rochosos com pouca cobertura vegetal (LOPES, *et. al.*, 2018).

O Ceará também apresenta altas perdas de solo ($9,7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), em relação ao índice de chuvas, quando comparadas a outras regiões do Brasil (MEDEIROS *et al.*, 2016; LENSE *et al.*, 2020). Portanto, devem ser adotadas ações práticas para a conservação do solo, com vistas a reduzir o processo erosivo que, a longo prazo (AVANZI *et al.*, 2013). Além disso, os danos causados nas regiões semiáridas devido aos processos erosivos e à escassez hídrica impactam de maneira severa a sustentabilidade das atividades agropecuárias (SOUSA; PAULA, 2019).

Para conservação e preservação dos solos é necessário considerar as características edafoclimáticas do Ceará, respeitando os ecossistemas e a condição social e econômica da região. No Estado do Ceará foram criadas 26 Unidades de Conservação, incluindo as de uso sustentável e as de proteção integral pela Lei nº 9.985 de 2000, também conhecida como Lei do Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), o que não garante plenamente a eliminação dos riscos de degradação ambiental, devendo estas áreas estarem sob constante avaliação e cuidado (ARRUDA; FEDEL, 2020).

O apoio à agricultura familiar pautada na agroecologia é um sistema adequado à conservação do solo no semiárido (LIMA; GAMARRA-ROJAS, 2017). No Ceará, os principais cultivos são os temporários de grãos, principalmente para subsistência; os cultivos permanentes também fazem parte da atividade da agricultura familiar, produzindo vários tipos de frutas inclusive para a exportação (SANTOS; CAMPOS, 2021). O modo de produção para subsistência pode ser um grande aliado no uso sustentável da terra; o cultivo orgânico é também um exemplo de prática agroecológica que contribui para a conservação dos recursos ambientais. Ainda, as práticas conservacionistas utilizadas no semiárido cearense, como a utilização do resíduo agroindustrial da palha de carnaúba para redução da variação da temperatura e controle da umidade do solo (ARAÚJO *et. al.*, 2013). A agricultura familiar pode fazer muito mais do que produzir alimentos, com o devido apoio, pode promover a conservação de paisagens e da diversidade biológica e a geração de postos de trabalho, além da redução da erosão hídrica e a conservação do solo (LIMA *et al.*, 2019).

CONCLUSÕES

O estudo apontou uma perda de solo média de 9,7 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no estado do Ceará, com 38% da região com taxas de erosão hídrica acima dos níveis da TPS. Estas áreas estão localizadas principalmente nas áreas não vegetadas, nos cultivos agrícolas e nas pastagens.

Os resultados demonstram que mesmo em uma região com seca severa e relativo baixo nível de chuvas, podem haver elevadas taxas de erosão hídrica devido, principalmente, às características dos solos da região.

Os resultados do trabalho podem contribuir no auxílio de tomada de decisões de políticas públicas para conservação do solo a longo prazo; bem como na escolha de medidas mitigadoras e de recuperação da capacidade de produção agrícola.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa ofertada ao autor. Este estudo foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código Financeiro 001.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. W. et al. 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. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AVANZI, J. C. et al. Distribuição espacial do risco de erosão hídrica em uma bacia hidrográfica com eucalipto e mata atlântica. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 37, n. 5, p. 427–434, 2013.

ARAÚJO, A. K.; ARAÚJO FILHO, J. A.; MARANHÃO, S. R. . Consórcios de milho, feijão e mandioca em presença de bagana de Carnaúba em um Argissolo no Litoral Norte do Ceará sob condições de sequeiro. **Essentia**, v. 18, n. 1, p. 2–23, 2013.

ARRUDA, G. C. M.; FEDEL, I. R. Unidades de Conservação Ambiental no Estado do Ceará: Implantação e Sustentabilidade. **Veredas do Direito: Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável**, v. 17, n. 37, p. 213–239, 2020.

BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do Estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 3, p. 657–668, 2000.

BERTOL, I.; CASSOL, E. A.; BARBOSA, F. T. **Erosão do solo**. In: BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; SOUZA, L. S. Manejo e conservação do solo e da água. Viçosa - MG: SBCS, 2019. Cap. XIV, p. 423-460, 2019.

CARNEIRO, V. A.; PAULO, P. O.; MELO, E. M. L. Paisagens degradadas do município de Palmelo (Goiás): o estudo das voçorocas via trabalho de campo. **GeoTextos**, v. 10, n. 1, p. 179–208, 2014.

DECHEN, S. C. F. et al. Losses and costs associated with water erosion according to soil cover rate. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p. 224–233, 2015.

EFTHIMIOU, N.; LYKOUDI, E.; KARAVITIS, C. Comparative analysis of sediment yield estimations using different empirical soil erosion models. **Hydrological Sciences Journal**, v. 62, n. 16, p. 2674–2694, 2017.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento exploratório de reconhecimento de solos do estado do Ceará**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos 2017 - Escala 1:6.000.000.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema de Informação de Solos Brasileiros - SISolos**. Embrapa Solos e Embrapa Informática Agropecuária, 2014, Brasília - DF. Disponível em: <http://www.sisolos.cnptia.embrapa.br>. Acesso em 14 de maio de 2021.

ESRI - Environmental Systems Research Institute. **ARCGIS Professional GIS for the desktop version 10.5**. Redlands, California, Software, 2016. Available in: <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.5/get-started/setup/arcgis-desktop-quick-start-guide.htm>>. Accessed: Jul. 27, 2021.

FUNCEME, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos - Mesorregião do Sul Cearense**. Fortaleza: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2012.

GAVRILOVIC, S. A. A method for estimating the average annual quantity of sediments according to the potency of erosion. **Bulletin of the Faculty of Forestry**, v. 26. p. 151-168, 1962.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/panorama>, página acessada em Janeiro de 2021. Acesso em 14 de maio de 2021.

LENSE, G. H. E. et al. Effects of deforestation on water erosion rates in the Amazon region. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 4, p. 1-7, 2020.

LIMA, C. A. et al. Characteristics of rainfall and erosion under natural conditions of land use in semiarid regions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 11, p. 1222-1229, 2013.

LIMA, É. R. et al. Perfil dos agricultores familiares da agrovila Canudos, Ceará-Mirim/RN, e aceitação do *Carthamus tinctorius* L. – oleaginosa promissora para biodiesel. **Nature and Conservation**, v. 12, n. 3, p. 17–24, 2019.

LIMA, R. V.; GAMARRA-ROJAS, G. Camponeses e a mandalla no semiárido brasileiro: reflexões sobre sustentabilidade com base em um estudo de caso com abordagem agroecossistêmica. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 34, n. 2, p. 161–195, 2017.

LOPES, L. M. et al. Estudo comparativo de erodibilidade de solos do semiárido cearense por métodos indiretos. **In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS E PARTÍCULAS NAS AMÉRICAS**, 13, 2018, Vitória. Hidrossedimentologia no contexto nexu para uma sociedade sustentável. Vitória: Associação brasileira de recursos hídricos, 2018, p. 1-7.

MAPBIOMAS PROJECT. **Coleção 5 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil, 2019**. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/>>. Acesso: 27 de Agosto de 2021.

MARQUES, F. Custos da erosão do solo em razão dos seus efeitos internos e externos à área de produção agrícola. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 36, n. 1, p. 61–80, 2019.

MEDEIROS, G. O. R. et al. Estimates of annual soil loss rates in the state of São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, São Paulo, v. 40, p. 1–18, 2016.

MIRANDA, E. E. **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 14 jan. 2021.

MONTEIRO, J. B.; ZANELLA, M. E. Eventos extremos no estado do Ceará, Brasil: uma análise estatística de episódios pluviométricos no mês de março de 2019. **GeoTextos**, Bahia, v. 15, n. 2, p. 149–173, 2019.

MUNIZ, F. L. et. al. Classificação climática para o estado do Ceará utilizando distintos sistemas de caracterização. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, 22, 2017, Florianópolis. p. 1-8.

PES, L. Z.; GIACOMINI, D. A. **Conservação do Solo**. Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2017.

RIBEIRO FILHO, J. C. et al. Raifall characterization and sedimentological responses of watersheds with diferemt land uses to precipitation in the semiarid region Brazil. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 2, p. 468–478, 2017.

SAKUNO, N. R. R. et al. Adaptation and application of the erosion potential method for tropical soils. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 51, n. 1, e20186545, 2020.

SANTOS, L. O.; CAMPOS, K. C. Modernização da agropecuária dos municípios do Estado do Ceará. **Economia & Região**, v. 9, n. 2, p. 115, 2021.

SOBRINHO, S. F. Precipitação e erosão do solo na Serra das Matas no ambiente do semiárido cearense. **Fórum ambiental da Alta Paulista**, v. 11, n. 6, p. 17, 2015.

SILVA, D. F. et. al. Previsão Climática e de Ciclos Climáticos para o Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 959–977, 2013.

SOUSA, F. R. C.; PAULA, D. P. Análise de perda do solo por erosão na Bacia Hidrográfica do Rio Coreaú (Ceará-Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 3, p. 491-507, 2019.

SPALEVIC, V. Impacto do uso da terra no escoamento e erosão do solo em Polimlje. 2011. Tese de Doutorado em Agricultura na Universidade de Belgrado, Sérvia. 260 p.

TAVARES, A. S. et al. Modeling of water erosion by the erosion potential method in a pilot subbasin in southern Minas Gerais. Londrina. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 2, p. 555–572, 2019.

VUJACIC, D.; SPALEVIC, V. Assessment of Runoff and Soil Erosion in the Radulicka Rijeka Watershed, Polimlje, Montenegro. **Agriculture and Forestry**, v. 62, n. 2, p. 283–292, 2016.

WESTER, T.; WASKLEWICZ, T.; STALEY, D. Functional and structural connectivity within a recently burned drainage basin. **Geomorphology**, v. 206, p. 362–373, 2014.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. **Supersedes Agriculture Handbook**. Washington, United States Department of Agriculture, 1978. 67 p.