



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Análise multicritério em geoprocessamento como contribuição ao estudo da vulnerabilidade à erosão no estado do Ceará

Mirelle Tainá Vieira Lima¹, Carlos Wagner Oliveira², Marcelo Martins Moura-Fé³,

¹ Ma. em Desenvolvimento Regional Sustentável pela Universidade Federal do Cariri. mirellet.vieira@gmail.com (autor correspondente). ² Dr. Professor Associado na Universidade Federal do Cariri. Rua Ícaro de Sousa Moreira, 126, Barro Branco, CEP 63.130-025, Crato, Ceará. (88) 3521-9514. carlos.oliveira@ufca.edu.br ³ Professor Titular da Universidade Regional do Cariri, Departamento de Geociências - DEGEO. Rua Coronel Antônio Luiz, Pimenta, CEP 63105000, Crato, Ceará, (88) 31021212. marcelo.mourafe@urca.br

Artigo recebido em 29/06/2020 e aceito em 15/03/2021

RESUMO

Conhecer o potencial erosivo do solo é imprescindível à compreensão dos problemas ambientais, bem como, as medidas necessárias para a preservação/conservação e planejamento ambiental. Tendo em vista que esse é um problema preponderante em regiões semiáridas, o presente trabalho pretende mensurar o nível de susceptibilidade à erosão antrópica nos limites territoriais do estado do Ceará, através da análise dos fatores ambientais envolvidos no processo, como: litologia, declividade, pedologia, intensidade de chuva, nível de cobertura vegetal do solo e seus tipos de ocupação. Cada fator analisado foi reclassificado de acordo com o nível de vulnerabilidade à erosão, em uma escala de 1 a 3 e, posteriormente, submetidos a média ponderada. Para tal, dispôs-se de imagens do satélite Landsat 8, além de dados e materiais provenientes do Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará - IPECE, da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM e do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Como instrumentos da pesquisa, utilizou-se técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, a bordo do software gratuito QGIS. O índice obtido apontou valores entre 0,7 e 2,7, com média de 1,7, aproximadamente. Este trabalho propõe um modelo de estudo para áreas de interesse muito grandes, e serviu para apontar as características do estado de forma mais geral. As áreas que apresentam maior vulnerabilidade foram aquelas com maior interferência antrópica e sem vegetação. Verifica-se que as ferramentas de SIG são instrumentos muito eficazes em análises ambientais desta natureza e podem ser utilizadas pelos órgãos competentes no planejamento e gestão ambiental.

Palavras-chave: degradação ambiental, zoneamento, solos, semiárido.

Empirical method of geoprocessing as a contribution to the study of vulnerability to erosion in the state of Ceará

ABSTRACT

The knowledge about the soil's erosive potential is essential to understanding environmental problems, as well as the necessary measures for preservation/conservation and environmental planning. Considering that this is a preponderant problem in semiarid regions, this present work aimed to measure the level of the anthropic erosion susceptibility in the territorial limits of the state of Ceará, through the analysis of the environmental factors involved in this process, such as: lithology, slope, pedology, rain intensity, level of vegetal cover of the soil and its types of occupation. Each factor analyzed was reclassified according to the level of vulnerability to erosion, on a scale of 1 to 3 and subsequently subjected to a weighted average. As research instruments, images of the Landsat 8 satellite, in addition to data and materials from the Ceará Economic Research and Strategy Institute - IPECE, the Mineral Resources Research Company - CPRM and the Meteorology National Institute - INMET. Geoprocessing and Remote Sensing techniques were used, using the free QGIS software. The index obtained was approximately 0.7 to 2.7, with an average of 1.7. This work proposes a study model for very large areas of interest, and served to point out the characteristics of the state in a more general way. The areas with the greatest vulnerability were those with the greatest anthropic interference and without vegetation. GIS tools are very effective instruments in this kind of environmental analyzes and can be used by the competent agencies in environmental planning and management.

Keywords: environmental degradation, zoning, soils, semiarid.

Introdução

A presença do solo erodido é um dos estágios finais da degradação de um ambiente natural. Em linhas gerais, este é o processo pelo qual as partículas do solo são carregadas para outros locais, devido aos processos naturais e/ou antrópicos, até expor a rocha matriz (Nascimento, 2017; Stead, Stead, 2015; Leite et al., 2016, CPRM, 2017).

Sendo um evento natural, a dinâmica da erosão dos solos é um processo cíclico, equilibrado e contribui para a transformação da paisagem (Caldas et al., 2019). No entanto, os processos erosivos ocasionados pela ação antrópica (ação do homem) são mais preocupantes. Ao passo que a erosão natural ocorre de maneira lenta, conforme Carneiro et al. (2014), e é facilmente recuperada pelos próprios mecanismos do ambiente, tendo, portanto, poucos efeitos; a erosão causada pela ação do homem pode ter consequências irreversíveis ou que serão necessários vários anos para a sua recuperação.

A suscetibilidade à erosão, ou seja, a probabilidade natural do processo erosivo ocorrer, é definida pelos parâmetros que condicionam os processos erosivos, tais como: tipo de rocha/solo, precipitação, declividade, extensão da encosta e estrutura da vegetação. Enquanto que, a vulnerabilidade à erosão, abrange a interação do homem com o meio e os riscos gerados à sociedade (Santos, Nascimento, 2019; Smith, 2004).

Conforme Sobrinho (2015), a erosão e a conservação do solo são desafios que acompanham o homem desde os primórdios da agricultura, e vem se intensificando devido a magnitude da destruição da natureza, como a contaminação da água decorrente da evolução da mecanização e do cultivo em áreas extensivas. O mesmo autor ressalta que as perdas de solo pela erosão afetam a vida de diversas formas, podendo afetar todo um povo, mas, principalmente o lavrador. Afirma, ainda, que o Brasil perde, por erosão laminar, cerca de quinhentos milhões de toneladas de terra anualmente; cujo prejuízo lento e continuado tem repercutido na economia e na fisionomia empobrecida de algumas regiões.

E este é um problema mundial. Aponta o relatório da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2015), que 33% do solo mundial está exposto a processos de degradação.

No Brasil, segundo caldas et al. (2019), desenvolveu-se intensamente atividades agrícolas e pecuárias ao longo dos anos, propiciados pela vastidão de suas terras agricultáveis, clima tropical

e relevo suave ondulado. Em vista disso, os solos passaram a apresentar problemas de erosão acelerada, ocasionados pelo desmatamento, queimadas, pisoteio animal, dentre outros fatores. Outras intervenções humanas capazes de gerar movimentações de solo são as urbanizações, obras da construção civil e aberturas de estradas.

De acordo com Rubira et al. (2019), os problemas decorrentes dos processos erosivos são preocupantes e cada vez mais acelerados no Brasil, devido às práticas agrícolas, instalações urbanas e à interação natureza-sociedade. De acordo com os mesmos autores, do ponto de vista econômico, a erosão destrói a infraestrutura urbana (galerias pluviais, redes elétricas, praças, lagoas de tratamentos de efluentes, linhas de esgotos, vias asfálticas, entre outras); no quesito ambiental, promove o assoreamento de lagos e canais fluviais, altera o fluxo subsuperficial em alguns casos, empobrece o solo devido à perda de nutrientes, entre outros problemas.

Ademais, existem os aspectos sociais e sanitários. Nas regiões urbanas, as áreas escavadas pela erosão tendem a atrair vetores patogênicos em função do acúmulo de lixo e esgoto, diminuindo a qualidade de vida da população limítrofe (Rubira et al., 2019).

As consequências da aceleração dos processos erosivos, ocasionados pela ação antrópica, consistem na perda de produtividade, avanço das fronteiras agrícolas, assoreamento e contaminação dos corpos d'água, além de perda da biodiversidade (Ribeiro et al., 2016; Zanchin et al., 2018).

Sousa e Paula (2019) afirmam que os problemas decorrentes dos processos erosivos são intensificados nas regiões semiáridas, devido às suas características morfoestruturais, pedológicas e pelo regime hidrológico, marcado pela escassez hídrica, que torna as atividades econômicas, como a agropecuária, potencialmente impactantes. Segundo Moreira et al. (2017), nas regiões semiáridas, a perda de solo por erosão pode ser considerada, ao mesmo tempo, causa e efeito do processo de desertificação.

Conforme Vital e Girão (2015), as características peculiares de regiões semiáridas, associadas aos seus agentes físico-naturais, demandam especificidades em sua análise. Segundo eles, a ação dominante do intemperismo físico, junto a variação espaço-temporal das precipitações, induz ao balanço morfogenético positivo, e conseqüentemente a uma pedogênese de baixo grau. Dessa forma, ressalta-se a necessidade

de estudos aprofundados acerca da dinâmica geomorfológica da Caatinga, tendo em vista que o atual período de expansão das atividades econômicas na área de estudo tem induzido a sinais de degradação da estrutura superficial da paisagem.

O estado do Ceará está inserido no denominado “polígono das secas”, caracterizado pelo regime climático quente e semiárido, de precipitação média anual inferior a 700 mm/ano, concentradas em dois ou mais meses do ano (Brandão e Freitas, 2014). A escassez hídrica que castigou as populações sertanejas ao longo dos anos contribuiu para a formação de solos rasos e pouco desenvolvidos, sendo, portanto, solos mais vulneráveis às chuvas torrenciais, típicas da alta sazonalidade presente no estado. As condições hídricas refletem nas características do bioma da Caatinga, conferindo-lhe uma vegetação rala e espaçada que, por sua vez, contribuem com a exposição do solo e a intensificação da vulnerabilidade à erosão.

Conforme Listo e Xavier (2017), tendo em vista os danos causados na paisagem, inúmeras pesquisas foram desenvolvidas para prevenir e controlar a potencialização de processos erosivos, bem como, avaliar seus fatores condicionantes, visando a formação de políticas públicas que estabeleçam um melhor planejamento do uso da terra.

Nesse sentido, o conhecimento do potencial de erosão do solo é importante à compreensão dos problemas ambientais, pois permite identificar as práticas que mais contribuem para a preservação/conservação dos solos e ao planejamento ambiental (Sousa e Paula, 2019). Fazem-se necessários, pois, estudos analíticos de fragilidade, com base na sustentabilidade, conservação e recuperação dos solos.

Nunes e Leite (2017) defendem que a análise espacial da suscetibilidade e do potencial erosivo constituem um produto cartográfico básico a ser utilizado no zoneamento ambiental, como instrumento de auxílio na tomada de decisão sobre o ordenamento territorial, visto que permite apontar diretrizes para o planejamento ambiental e orientar os parâmetros de ocupação de um determinado espaço geográfico.

De acordo com Régis Filho (2008), a classificação de um território tem por objetivo a organização do espaço, a fim de responder e harmonizar as necessidades humanas com base na compreensão espacial do território. Dessa forma, são avaliadas as diversas estruturas que compõem o mesmo, procurando compor acertadamente as pretensões do uso racional do solo disponível. Completa que esta análise permite o planejamento, o estabelecimento das aptidões, vocações, capacidades e potencialidades do território para cada uso do solo. Visto que para planejar o bom uso de um ambiente, antes, é preciso conhecê-lo.

Presume-se que, devido a maior parte de seu território configurar um ambiente semiárido e ser coberto por rochas do embasamento cristalino, o estado do Ceará enfrenta grandes necessidades de conter os processos erosivos, dentro da sua diversidade paisagística.

O presente estudo dispôs da utilização de ferramentas do geoprocessamento e sensoriamento remoto, por meio de Sistema de Informação Geográfica (SIG), que constitui uma ferramenta fundamental à espacialização de informações territoriais e no auxílio à compreensão e discussão de diversos fatores ambientais. Inumeros autores aplicaram metodologias semelhantes para analisar o risco a erosão em suas áreas de interesse, tais como: Moura et al. (2017), Cabral et al. (2016), Fantinel e Benedetti (2016), Fantinel et al. (2018), Vital e Girão (2015), Ribeiro et al. (2016), dentre outros.

Neste trabalho pretende-se, portanto, mensurar o nível de susceptibilidade à erosão antrópica presente no território cearense, através da análise dos fatores ambientais envolvidos no processo, como: pedologia, litologia, declividade, intensidade de chuva, nível de cobertura vegetal do solo e seus tipos de ocupação.

Material e métodos

O estado do Ceará (Figura 1) possui um território equivalente a 148.887 km² e situa-se nas coordenadas geográficas 7°12'46" Sul e 39°18'54" Oeste. Faz divisa com os estados: Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco (Leste), e Piauí (Oeste).

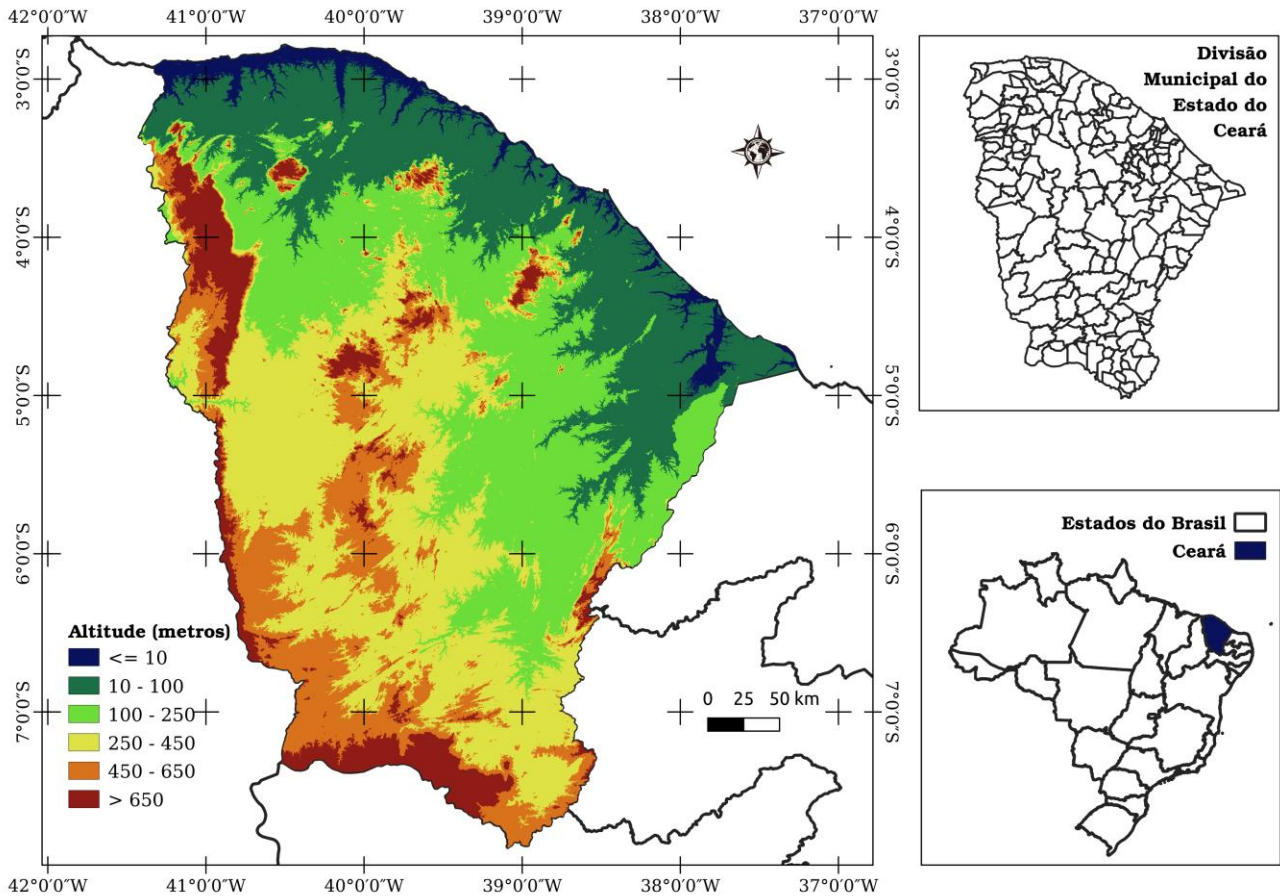


Figura 1. Mapa digital de elevação do Ceará. Fonte: Elaborado pelos autores.

As variáveis analisadas foram: aspectos geológicos, que incluem a declividade do terreno; pedologia e litologia; a agressividade das chuvas, estimada através do índice modificado de Fournier; os tipos de uso e ocupação do solo e o índice de vegetação por diferença normalizada – NDVI.

Inicialmente, o Modelo Digital de Elevação – MDE do estado foi obtido por meio do projeto TOPODATA (Banco de Dados Geomorfológicos do Brasil) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que no seu sítio eletrônico (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>) disponibiliza diversos recortes de MDE SRTM, com preenchimento de falhas e resolução espacial de 30 metros quadrados por pixel (ou 1 arco-segundo). A imagem foi recortada para a área de estudo de acordo com o limite do município em formato vetorizado (Shapefile), disponibilizado pelo Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará – IPECE. A partir do MDE da área de estudo, foram gerados valores de declividade, através da ferramenta Slope do Software QGIS, de acordo com a classificação da Embrapa (1979) e reclassificada de acordo com o nível de vulnerabilidade à erosão de 1 a 3, conforme Crepani et al. (2001), como mostra a Tabela 1.

O mapa pedológico (mapa das classes de solo) do estado do Ceará foi fornecido em formato shapefile pelo IPECE e classificado de acordo com a susceptibilidade de cada solo, conforme Crepani et al. (2001), sendo atribuídos pesos de acordo com a Tabela 2.

Tabela 1. Classes de declividade com os respectivos valores da escala de vulnerabilidade.

CLASSES	DECLIVE (%)	ESCALA
Muito Baixa	< 2	1
Baixa	2 – 8	1,5
Média	8 – 20	2
Alta	20 – 45	2,5
Muito Alta	> 45	3

Fonte: Embrapa (1979).

A caracterização litológica (tipos de rocha) do estado foi obtida a partir da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM e classificados de acordo com Crepani et al. (2001), conforme a Tabela 3.

Foi realizado o download em formato de texto (.txt) de todos os dados das estações da Funceme por meio do *site* e agrupados em um único arquivo do Excel. A partir desse ponto, foram selecionadas em tabela dinâmica apenas as

estações que possuíam dados ininterruptos entre 1989 e 2018, contabilizando 30 anos de coleta. Do total de 746 postos disponíveis, foram selecionados 181 destes para compor o mapa de pluviosidade média do Estado. Que foram especializados por interpolação dos dados, através do método Multilevel B-Spline, no software Qgis 2.14, ao qual também foram submetidos os dados geográficos de latitude.

Tabela 2. Valores de vulnerabilidade dos solos.

CLASSE DE SOLO	SIGLA	VU
LATOSSOLOS:AMARELO	LA	1
LATOSSOLO VERMELHO AMARELO	LV	
LATOSSOLO VERMELHO ESCURO	LE	
LATOSSOLO ROXO	LR	
LATOSSOLO BRUNO	LB	
LATOSSOLO HÚMICO	LH	
LATOSSOLO BRUNO-HÚMICO	LBH	
PODZÓLICO AMARELO	PA	
PODZÓLICO VERMELHO AMARELO	PV	
PODZÓLICO VERMELHO ESCURO	PE	
TERRA ROXA ESTRUTURADA	TR	2
BRUNO NÃO-CÁLCICO	NC	
BRUNIZÉM	B	
BRUNIZÉM VERMELHADO	BA	
PLANOSSOLO	PL	
CAMBISSOLOS	C	
SOLOS LITÓLICOS	R	
SOLOS ALUVIAIS	A	
REGOSSOLO	RE	
AREIA QUARTZOSA	A	
VERTISSOLO	V	2,5
SOLOS ORGÂNICOS	HO	
SOLOS HIDROMÓRFICOS	HI	
GLEI HÚMICO	HGH	
GLEI POUCO HÚMICO	HGP	
PLINTOSSOLO	PT	
LATERITA HIDROMÓRFICA	LH	
SOLOS CONGREGACIONÁRIOS	CL	
RENDZINAS	RZ	
AFLORAMENTO ROCIOSO	AR	

Fonte: Crepanni et al. (2001).

Tabela 3. Escala de vulnerabilidade à denudação das Rochas mais comuns.

Classe Litológica	VU
Quartzitos ou metaquartzitos	1,0
Riolito, Granito, Dacito	1,1
Granodiorito, Quartzo Diorito, Granulitos	1,2
Migmatitos, Gnaisses	1,3
Fonólito, Nefelina, Sienito, Traquito, Sienito	1,4
Andesito, Diorito, Basalto	1,5
Anortosito, Gabro, Peridotito	1,6
Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita, Clorita xisto	1,7
Piroxenito, Anfibolito, Kimberlito, Dunito	1,8
Hornblenda, Tremolita, Actinolita, xisto	1,9
Estaurolita xisto, Xistos granatíferos	2,0
Filito, Metassilito	2,1
Ardósia, Metargilito	2,2
Mármore	2,3
Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos	2,4
Conglomerados, Subgrauvacas	2,5
Grauvacas, Arcózios	2,6
Siltitos, Argilitos	2,7
Folhelhos	2,8
Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos	2,9
Sedimentos Inconsolidados: Aluviões, Colúvios etc.	3,0

Fonte: Crepanni et al. (2001).

A erosividade das chuvas foi calculada com base nos dados das estações pluviométricas da Funceme, entre 1989 e 2018, através do índice proposto por Salazar e Quintero (2015).

De acordo com essa metodologia, a erosividade anual histórica das chuvas pode ser calculada utilizando-se a Equação 1, que tem como variável independente o IMF do ano correspondente.

$$IE_{30} = \sum_1^{12} 38,4(IMF) + 28,3 \tag{1}$$

Onde, IE_{30} = Índice de Erosividade, calculado por 30 anos; IMF = Índice Fournier Modificado, calculado conforme a equação 2, Onde, IMF_j = Índice de Fournier modificado no ano j, P_{ij} = Precipitação do mês i, no ano j, P_j = precipitação total do ano j.:

$$IMF_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} (P_{ij})^2}{P_j} \tag{2}$$

O Índice de Erosividade (Equação 1) foi calculado individualmente para cada um dos 30

anos estudados, em cada estação pluviométrica, onde a partir da média mensal foi obtida a média anual histórica de cada estação meteorológica, bem como o IMF, calculado de acordo com a equação 2. Os dados obtidos foram interpolados através do método multilevel-b-spline no Qgis 2.14 e classificados de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4. Classificação do índice de erosividade e índice modificado de Fournier - IMF, conforme Salazar e Quintero (2015).

Erosividade	Classe	Score
<1.000	Natural	1
1.000 –	Muito	1,3
2.500 –	Baixa	1,5
5.000 –	Moderada	1,8
7.500 –	Alta	2,0
10.000 –	Muito	2,3
15.000 –	Severa	2,5
IMF	Classe	Score
<60	Muito	1
60-90	Baixa	1,5
90-120	Moderada	2
120-160	Alta	2,5
>160	Muito	3

Fonte: Salazar; Quintero (2015).

Para o mapeamento do uso e ocupação do solo e nível de cobertura vegetal do solo foram adquiridas imagens da plataforma Earth Explorer do U.S. Geological Survey (USGS), correspondentes aos sensores *Operational Land Imager (OLI)/ Thermal Infrared Sensor (TIRS)* a bordo do satélite Landsat 8. Este satélite possui resolução espacial de 30 metros por pixel nas bandas curtas (OLI) e 120 metros por pixel nas ondas longas (TIRS). Foram utilizados 11 recortes para cobrir todo o estado, com datas entre 2013 e 2015, correspondentes ao período seco (Agosto a Outubro) e com a menor quantidade de nuvem. As imagens foram classificadas no ambiente SIG QGIS 2.14. Cada componente do estudo foi reclassificada de acordo com o grau de vulnerabilidade à erosão, por meio das ferramentas “r.reclass” e “r.recode” do software QGIS 2.14, na escala de 1 a 3, indo do menor para o maior risco à erosão e constituindo, portanto, três classes de risco: baixo, médio e alto.

O nível de cobertura vegetal do solo foi obtida com base no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), contido numa escala de valores entre -1 e 1, capazes de identificar o tipo de cobertura da superfície. Em que, valores negativos correspondem a água, valores muito próximos ao zero, podem ser identificados como solo exposto e qualquer valor acima de 0,2

corresponde a algum nível de vegetação, cujos valores de reflectância foram os propostos por Allen et al. (2007), conforme a Equação 3.

$$NDVI = \frac{\rho_{t,ivp} - \rho_{t,vm}}{\rho_{t,ivp} + \rho_{t,vm}}$$

(3)

Onde: $\rho_{t,ivp}$ e $\rho_{t,vm}$ são refletâncias em satélite para as bandas do infravermelho próximo (850-880 nm) e vermelho (640-670 nm), respectivamente.

Os valores de NDVI foram identificados como: água (<0), solo exposto (0-0,2); vegetação rala ou esparsa (0,21-0,36) e vegetação densa (>0,36). Posteriormente, a imagem foi reclassificada atribuindo pesos as classes conforme risco de erosão, do maior para o menor: água: 0, solo exposto:3; vegetação rala ou esparsa: 2 e vegetação densa: 1. A classificação supervisionada do uso e ocupação do solo foi realizada dentro do software QGIS 2.14 através do complemento *Supervised Classifier Plugin - SCP* plugin. As classes atribuídas ao uso do solo e suas respectivas pontuações foram: nuvem ou água: 0; floresta: 1; caatinga arbustiva: 1,5; vegetação rasteira: 2,5; e solo exposto e urbanização:3, conforme Figura 2.

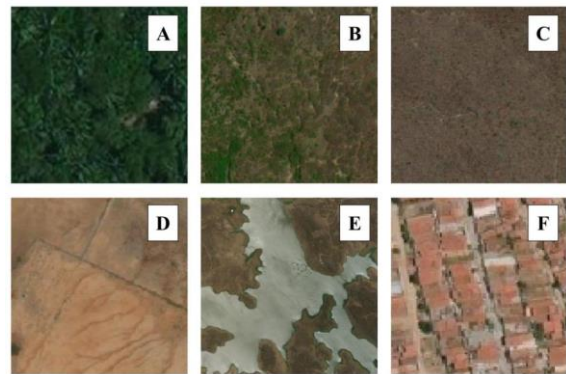


Figura 2. Padrões para classificar uso do solo como: floresta (A), vegetação arbustiva (B) vegetação rasteira (C), solo exposto (D), água (E) e zona urbana (F). Fonte: Elaborado pelos autores.

O sistema viário do Estado (rodovias), obtido em formato vetorial, foi contornado com um buffer de 10 metros e transformado em imagem raster para a composição do mapa final. A conexão dos parâmetros analisados foi realizada com base no método de ponderação analítica AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

O processo de hierarquia analítica (AHP) foi desenvolvido com o objetivo de apoiar a tomada de decisão quando variáveis qualitativas e quantitativas precisarem ser consideradas. O método foi introduzido por Saaty (1991) e

atualmente é empregado em análises de diversos campos do conhecimento. Através da plataforma *AHP Online Calculator*, disponível no domínio: <https://bpmsg.com/ahp/ahp-calc.php>, foram elencados os critérios e comparados mutuamente quanto a sua importância.

Em seguida foram obtidos os percentuais a serem atribuídos a cada um, conforme a prioridade exigida em formato de tabela e inserida no software Qgis 2.14, especificamente na calculadora Raster, onde foi realizada uma média ponderada estabelecendo os seguintes pesos (Tabela 5) para cada um dos componentes analisados.

Tabela 5. Pesos das variáveis utilizadas.

Variável	Peso (%)
Declividade do Terreno	25%
Cobertura Vegetal (NDVI)	25%
Uso e Ocupação do Solo	15%
Erosividade das Chuvas	15%
Pedologia	10%
Litologia	8%
Rodovias	2%

Resultados e discussão

A litologia compreende o estudo especializado em rochas, no que se referem às suas camadas, processos de litificação, classificações e aos tempos geológicos em que ocorreram. Por motivos diversos, aos quais a litologia se dedica saber, rochas diferentes podem dar origem a solos mais vulneráveis ou mais resistentes à erosão. Crepani et al. (2001) sugeriram um grau de susceptibilidade à cada tipo de rocha, em que o estado do Ceará se comporta como mostra a Figura 3.

De acordo com essa classificação, 61% das rochas no estado apresentam baixa susceptibilidade à erosão e um terço apresenta um risco elevado. Conforme Claudino-Sales e Lira (2011), o estado do Ceará, em sua grande diversidade de paisagens geomorfológicas, é composto basicamente por rochas sedimentares e cristalinas de idades variadas, importantes e variáveis fatores para a modelagem do relevo.

As rochas do embasamento cristalino cobrem a maior parte dos limites territoriais do Ceará (Souza, 2007). Essas rochas possuem considerável capacidade de infiltração da água onde se tem a ocorrência de fraturas, o que impede a retenção da água da chuva, que sofrem rapidamente o processo de evaporação. Somam-se a isso as elevadas temperaturas, o baixo índice pluviométrico, a vegetação rala das depressões sertanejas que agravam o problema das secas e susceptibilidade à degradação ambiental.

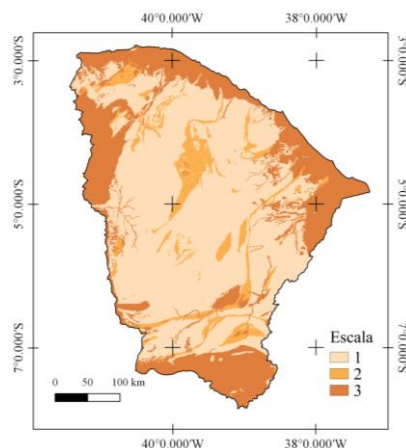


Figura 3. Mapa Litológico do Ceará, classificado conforme a escala de vulnerabilidade à denudação das Rochas de Crepani et al. (2001). Fonte: Dados da CPRM; Classes de Crepani et al. (2001).

Conforme Fantinel e Benedetti (2016), as rochas, os minerais e os depósitos sedimentares responsáveis pela formação dos solos, ao passar dos anos, sofrem com processos de intemperismo e acabam sendo lixiviados ou solubilizados. “Esse desgaste pode ocasionar a erosão principalmente quando o solo fica exposto, seja pelo desmatamento, queimadas ou pelo pisoteio dos animais e, com a ação gradativa das chuvas seus materiais vão sendo arrastados ocasionando erosões” (Fantinel e Benedetti, 2016, p. 161).

Normalmente, os solos na região semiárida são pouco desenvolvidos devido à escassez das chuvas, que gera a mitigação dos processos químicos, os neossolos (litólicos ou flúvicos) são um bom exemplo. A vegetação está adaptada ao clima e pode funcionar como uma esponja para a retenção de água por mais tempo, entretanto, por ser rala e muito espaçada, deixa o solo nu e suscetível à erosão mecânica do vento e da água, que carregam as partículas do solo.

A degradação é intensificada pelas queimadas e desmatamentos, feitos para obtenção de lenha e execução de atividades agropecuárias, cujo fator contribui para o desaparecimento de diversas espécies, e caracteriza uma perda considerável da biodiversidade deste ecossistema (Araújo, 2011).

Para Coelho et al. (2014), uma das causas de impactos em áreas naturais causados pelo uso de solo, é a exploração intensa de áreas em função da agricultura e pecuária familiar, muito presente na região semiárida do Nordeste brasileiro. Podendo causar perda da biodiversidade, infertilidade do solo e avanço da erosão (Vanzela et al., 2010).

A pedologia constitui uma vertente da ciência do solo responsável por estudar a origem, a forma e as classes dos solos, que tem um papel

essencial para a determinação do potencial e das limitações de uma região.

Segundo Silva et al. (2003), as diferentes classes de solo proporcionam resistências distintas à erosão, sobretudo, em função da estrutura, textura, taxa de infiltração, permeabilidade, densidade e porosidade.

A Figura 4 apresenta uma classificação do grau de vulnerabilidade pedológica à erosão no estado de 1 a 3.

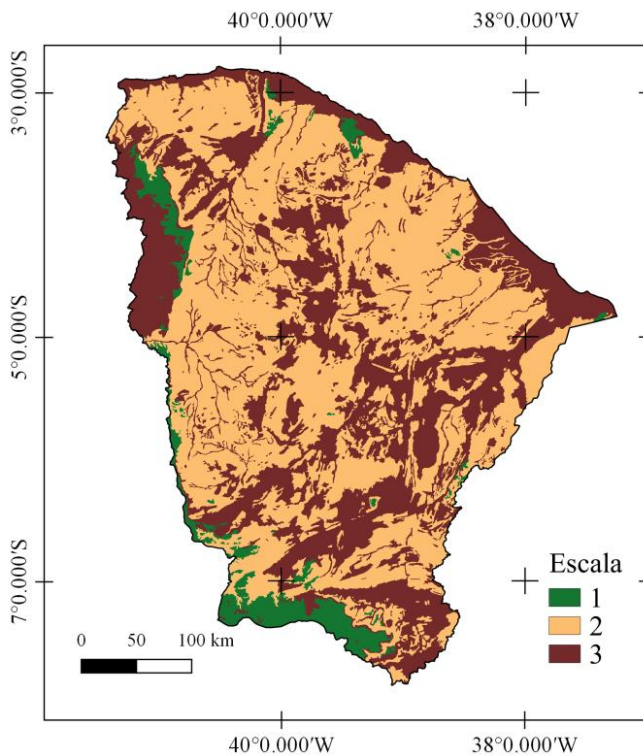


Figura 4. Mapa da Pedologia do estado do Ceará, classificada de acordo com a escala de vulnerabilidade à denudação das Rochas determinadas por Crepani et al. (2001). Fonte: Dados da CPRM; Classes de Crepani et al. (2001).

No que diz respeito aos tipos de solos no estado do Ceará, 56% do território apresenta média vulnerabilidade à erosão e outros 39% apresenta risco elevado. A pedologia é um ponto importante a ser considerado quando se estuda a viabilidade técnica e econômica de uma atividade em determinada região, bem como o planejamento de uso do solo. Conforme apresenta estudo realizado pela Embrapa, dos autores Lima et al. (2002), o Estado do Ceará apresenta 148.887 km², deste total, 8,5% da área é ocupada por espelhos d'água, restando uma área de 137.825 km² ocupada majoritariamente por solos. Destes solos, 9,7% são enquadrados no grau de limitação Nulo, 15,6% como grau de limitação Ligeiro, 54,1% como grau de limitação Moderado, 6,7% como grau de limitação Forte e 13,9% como grau de limitação Muito Forte.

Lopes et al. (2018) afirma que o Estado do Ceará, por enquadrar-se no contexto do semiárido brasileiro, apresenta solos são mais vulneráveis à erosão, em consequência do clima seco, solos rasos e pobres em matéria orgânica e rala cobertura vegetal.

A vegetação é outro importante componente natural capaz de impedir um processo de erosão. Nesse estudo, o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), obtido por meio de imagens de satélite, representa o nível de cobertura vegetal e será utilizado como um indicador de vulnerabilidade à erosão, conforme apresenta a Figura 5.

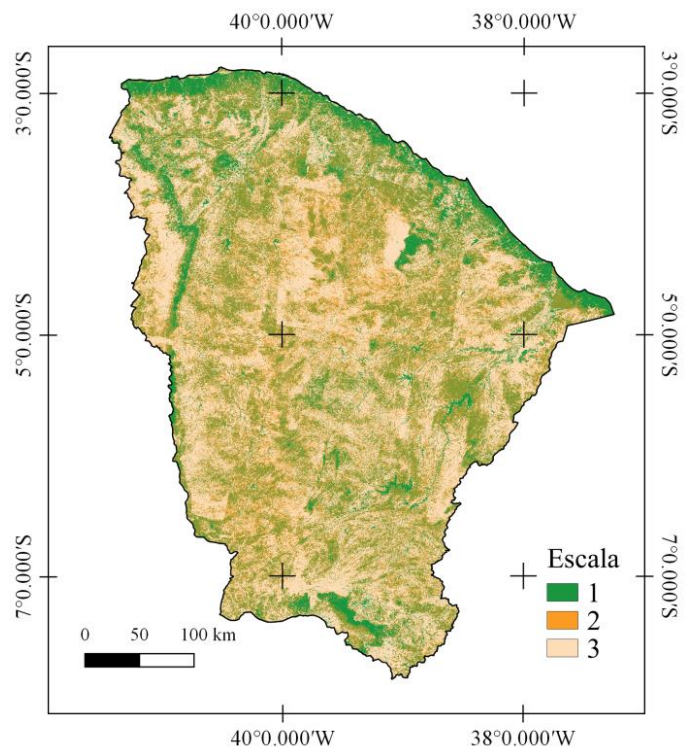


Figura 5. Espacialização do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI no estado do Ceará. Fonte: Elaborado pelos autores.

As vegetações mais adensadas e vigorosas começaram a ser identificadas a partir do índice de NDVI igual a 0,34 até 1,0. O solo exposto foi identificado de 0 a 0,2, a partir de onde surgiram os primeiros níveis de vegetação entre 0,21 e 0,36, que caracteriza a maior parte do território cearense, ou seja, vegetação rala e esparsa. Os valores encontrados abaixo de zero representaram a água. A escolha das imagens referentes ao ano de 2013, por ter sido um ano de baixa pluviosidade em relação à média histórica e pouca ocorrência de nuvens, permite localizar onde realmente há vegetação, mesmo que em um período seco. Verifica-se que neste ano, o NDVI no Ceará manteve-se entre 0,2 e 0,3, com a maior ocorrência do índice igual a 0,23 (Figura 6).

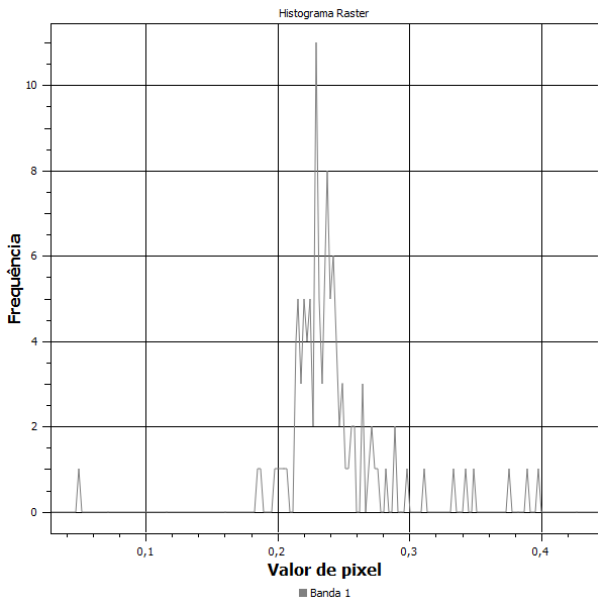


Figura 6. Histograma do raster de NDVI do estado do Ceará. Fonte: Produto do Software QGIS.

De acordo com Sales (2019), a cobertura vegetal é um dos mais importantes fatores de proteção do solo contra a erosão hídrica. Conforme Makaya et al. (2019) a baixa cobertura vegetal em encostas muito íngremes indica alta vulnerabilidade à erosão.

Conforme Oliveira (2016), o relevo terrestre é o resultado da interação entre os processos geológicos internos e externos à crosta terrestre, sobre a qual a ação antrópica pode modificar sua gênese natural e possibilitar a instalação de processos erosivos.

Como resultado de uma prolongada atuação dos processos erosivos e denudacionais da superfície, no estado do Ceará predominam-se superfícies aplainadas da Depressão Sertaneja, com cotas suavemente posicionadas (Brandão e Freitas, 2014).

A Figura 7 apresenta o relevo do estado do Ceará classificado de acordo com a sua declividade e conforme as classes propostas pela Embrapa (1979).

Nota-se que quase todo o território cearense (79,7%) é composto por declividades que vão do Plano ao ondulado (até 20% de declividade), poucas vezes encontra-se áreas com declive forte-ondulado e raras vezes montanhoso. 19,3% do território apresentam risco médio e 1% risco alto. As planícies ocupam grande parte do litoral e das chapadas do Apodi e Araripe.

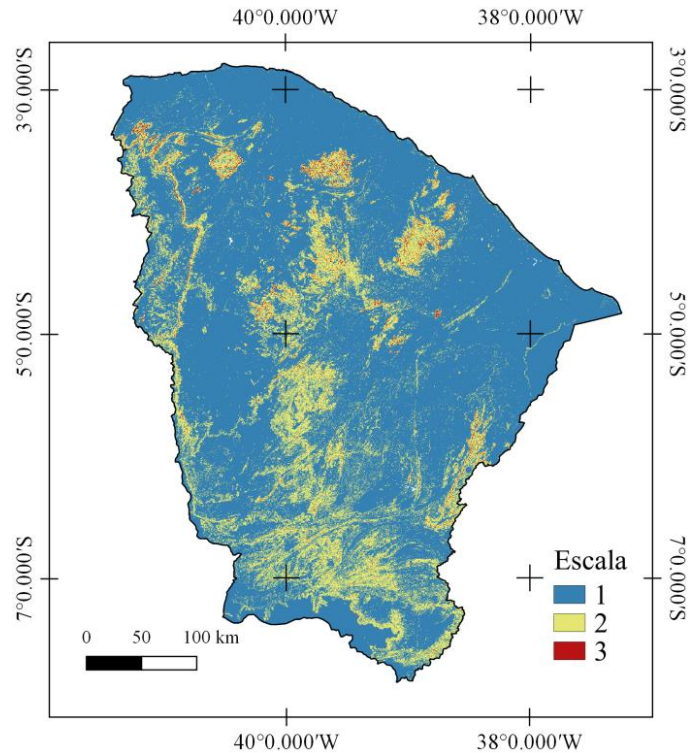


Figura 7. Mapa de declividade do Estado do Ceará. Fonte: Elaborado pelos autores.

De acordo com Régis Filho (2008), a classificação de um território tem por objetivo a organização do espaço, a fim de responder e harmonizar as necessidades humanas com base na compreensão espacial do território. Dessa forma, são avaliadas as diversas estruturas que compõem o mesmo, procurando compor acertadamente as pretensões do uso racional do solo disponível. Completa que esta análise permite o planejamento, o estabelecimento das aptidões, vocações, capacidades e potencialidades do território para cada uso do solo. Visto que para planejar o bom uso de um ambiente, antes, é preciso conhecê-lo.

A fim de se conhecer as interferências antrópicas realizadas no Estado, a classificação do uso e ocupação do solo no território cearense apresenta-se na Figura 8.

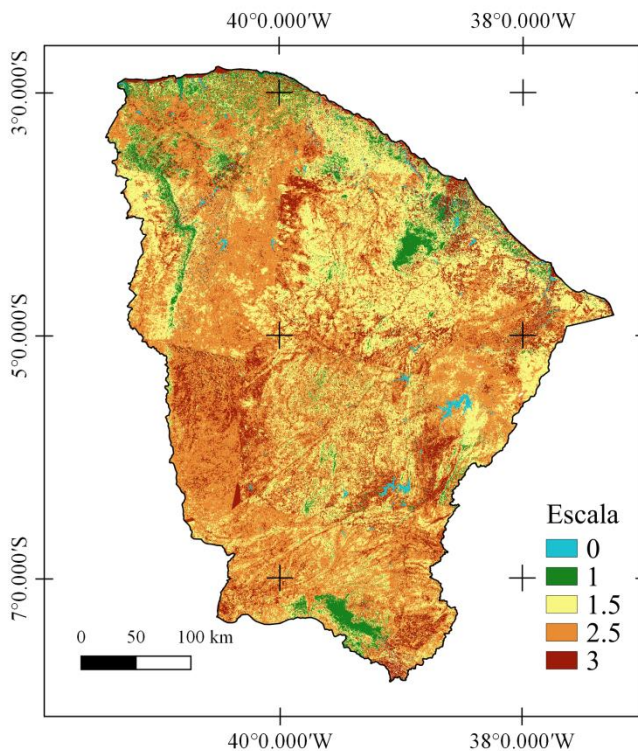


Figura 8. Mapa de uso e ocupação do solo no estado do Ceará. Fonte: Elaborado pelos autores.

Identifica-se que 52% das cenas classificadas representam um risco à erosão baixo a medianamente baixo, sendo composta por floresta, caatinga arbustiva, bem como, a água e nuvem com peso nulo; outros 48% apresentam risco alto a medianamente alto, referentes às classes: vegetação rasteira, solo exposto e urbanização.

Nota-se que a maior parte do território é ocupada por vegetação rala ou esparsa. O comprimento de onda refletido pelo solo exposto ao satélite muito se assemelha aos comprimentos de onda refletidos pelas áreas urbanizadas. Provavelmente, por conta do material que são feitos os telhados. Esse motivo dificultou algumas vezes a identificação de áreas urbanizadas, confundidas por vezes com solo exposto.

Moura et al. (2017), analisando a vulnerabilidade à erosão relacionada aos aspectos solo e vegetação na bacia experimental de Iguatu - situada na sub-bacia do Alto Jaguaribe na porção sudoeste do Estado do Ceará - verificaram que, em seus 16,74 km², quase a totalidade da área (89,21%) pertence às classes moderadamente vulnerável e vulnerável, quanto a vegetação e ocupação do solo, devido ao fato dessa bacia se compor de áreas com Caatinga antropizada, área antropizada, vegetação úmida e agricultura. E 10,87 km² de extensão classificada como medianamente estável/vulnerável, quanto aos solos.

A intensidade das chuvas é outro fator de grande potencial erosivo. A espacialização do Índice de Erosividade das Chuvas, descrito por Salazar e Quintero (2015), no Ceará encontra-se na Figura 9, onde a chuva atua de forma moderada na maior parte do Estado, tendo nas regiões litorâneas, da Ibiapaba e do Cariri as maiores concentrações de Chuva.

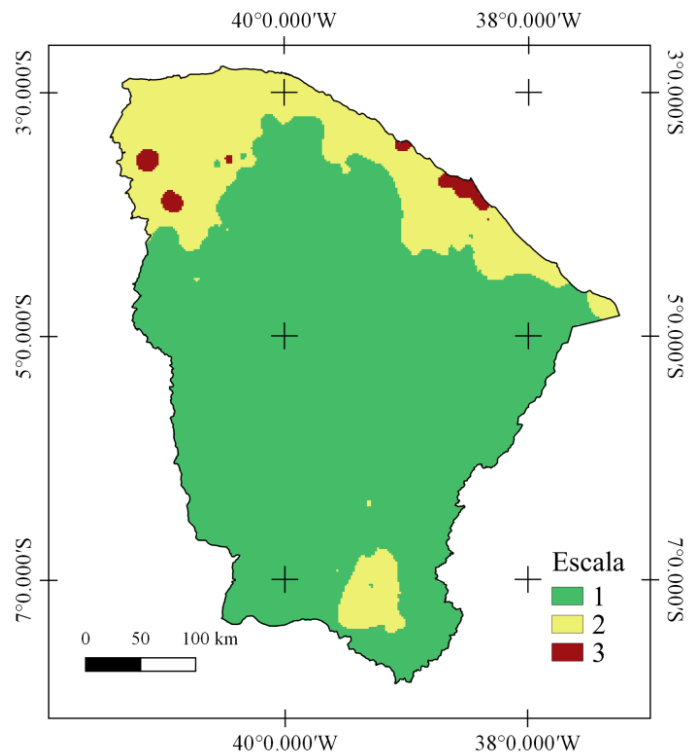


Figura 9. Mapa de Erosividade das Chuvas no estado do Ceará. Fonte: Elaborado pelos autores.

Na maior parcela do estado (77,78%) as chuvas apresentam um baixo potencial erosivo, um médio potencial em 21,24% e alto potencial em 0,98% do território. A chuva apresenta duas concepções em relação à erosão do solo. No caso deste estar descoberto e, preponderantemente, se apresentar acentuada declividade, constitui um fator de risco. Por outro lado, regiões com regularidade e intensidade de chuva constituem em geral, locais com maior quantidade de vegetação e que, por sua vez, representa um fator positivo no controle da erosão.

Panagos et al. (2016) descreveram a erosividade como um dos fatores mais dinâmicos dentro dos fatores utilizados para cálculo da erosão hídrica. Ressalta ainda que capturar a variação temporal e espacial da erosividade das chuvas possibilita uma maior precisão e acurácia

Lopes et al. (2015), avaliando a produção de sedimentos e assoreamento em reservatório no Semiárido: o caso do açude marengo, localizado às coordenadas 4° 51' 25" S 39° 34' 37" O, pertencente à Mesorregião dos Sertões Cearenses e

à microrregião do sertão de Quixeramobim, verificaram baixos valores de erosividade da bacia hidrográfica do açude, que variaram entre 6.034 a 6.225MJ mm ha-1ano-1, apresentando valor médio de 6.141MJ mm ha-1ano-1. Ressaltasse que nesta localidade predomina o relevo suave a ondulado, em que a classe de declive entre 0 e 5% ocupa mais de 90% da área.

Sobrinho (2015) realizou estudo com o objetivo de quantificar e avaliar o índice de precipitação e a sua capacidade de erosão em diversos tipos de manejo do solo localizado em ambientes da Serra das Matas no semiárido cearense. Para tal, analisou amostras de solo coletadas em áreas com plantio, em pousio e com vegetação. Os dados obtidos mostraram a erosão em função da precipitação, mostrou-se menos intensa nas áreas com cobertura e com maior tempo de vegetação presente, o que influenciou diretamente na estrutura do solo e em seus nutrientes.

O mesmo estudo identificou que o relevo está associado a esses fatores e condiciona o todo, através de suas declividades, evidenciando a natureza e magnitude dos processos e acelerando o deslocar dos nutrientes em seus elementos físicos e químicos.

A erosão é sempre maior quanto mais acentuada for a vertente e, conseqüentemente, a intensidade da precipitação, que constitui um fator primordial nesse processo, visto que o material erodido é proporcional ao total de chuva recebida (Sobrinho, 2015).

Com base nas variáveis apresentadas, foi gerado o mapa final deste estudo, onde as áreas destacadas em vermelho na Figura 10 representam as localidades com maior susceptibilidade à erosão e, portanto, áreas que necessitam de maior cuidado no manejo e uso do solo.

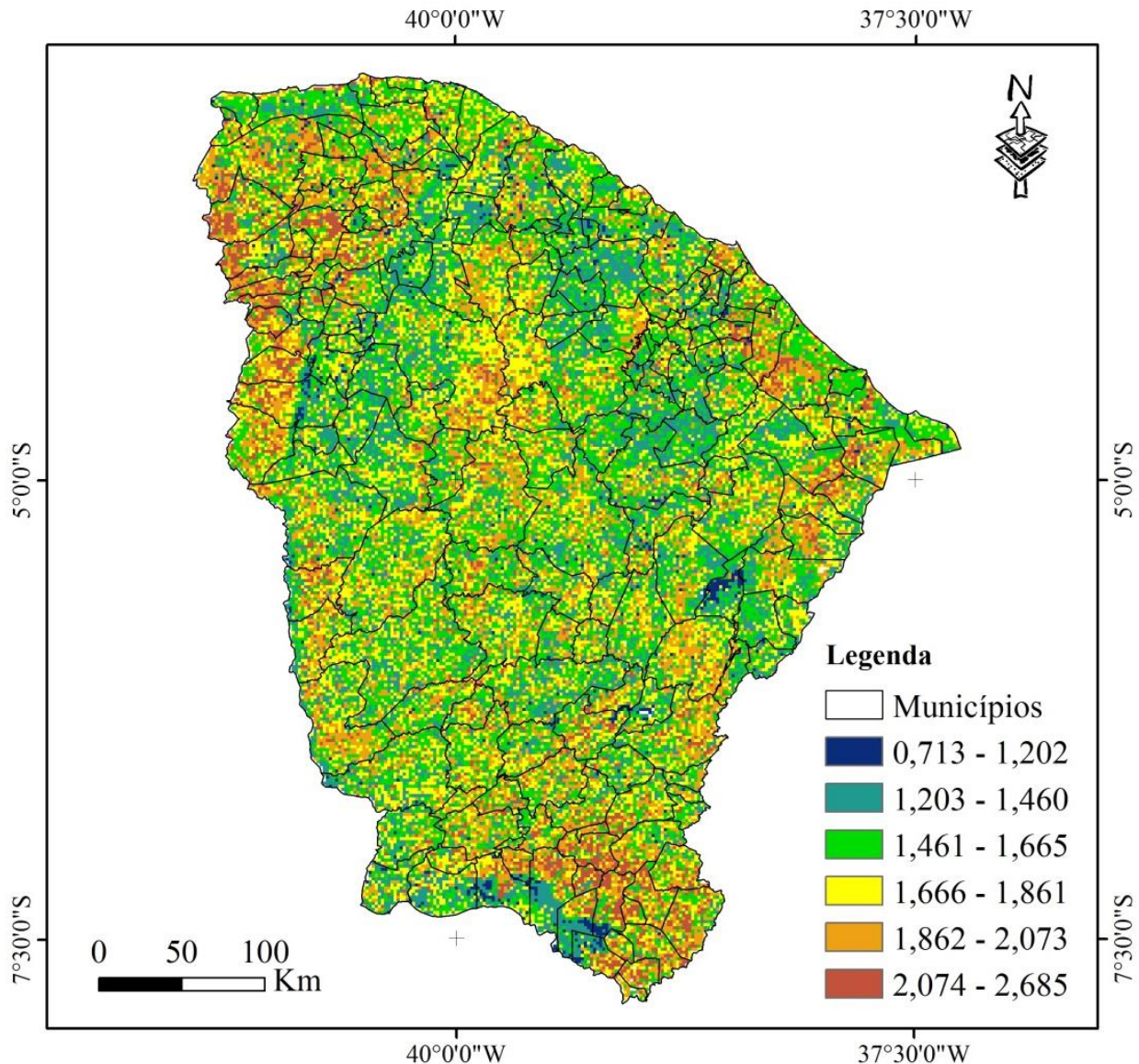


Figura 10. Mapa final de susceptibilidade à Erosão no Estado do Ceará

A fisionomia dos ambientes presentes no estado do Ceará apresenta grande diversidade. Há locais que apresentam alta vulnerabilidade aos processos erosivos, e outros com riscos mínimos. Pode-se observar o topo da chapada do Araripe, ao extremo sul, como um ponto seguro, porém não indicado à exploração antrópica e agropecuária, por se tratar de uma área que deve ser preservada.

O índice obtido foi de aproximadamente 0,7 a 2,7, com média de 1,7; sendo que quanto maior o resultado maior a vulnerabilidade do local. Observa-se na Figura 11 a distribuição de frequências por valores de *pixel*, correspondente ao índice de susceptibilidade à erosão encontradas no estado.

Em estudo realizado por Sales (2015), intitulado “Potencial de erosão das terras no núcleo de desertificação de Irauçuba estimada por meio dos parâmetros da EUPS”, verificou que o município, que constitui um núcleo de desertificação, apresenta 81,7%, 15,4%, 2,0% e 0,9% das terras do município inseridas, respectivamente, nas classes muito baixa, baixa, média e alta de risco potencial de erosão. No entanto, a autora alerta que o baixo risco potencial de erosão indicado deve ser visto com cautela. Visto que dá-se em função dos terrenos serem planos e haver pouca ocorrência de chuvas. No entanto, deve se considerar a ação das primeiras chuvas na região que, graças ao caráter decíduo da vegetação, deixa os solos completamente expostos ao trabalho erosivo das águas da chuva, além do pastoreio do gado.

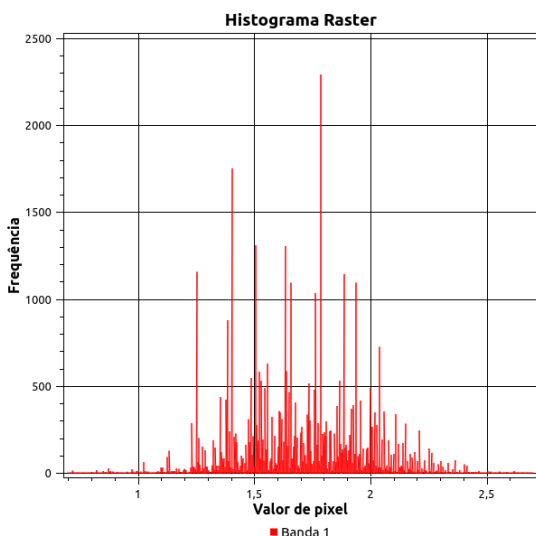


Figura 11. Histograma do mapa final de susceptibilidade à erosão no estado do Ceará. Fonte: Autores. Produto do Software QGIS.

Dias et al. (2012) estudando áreas de riscos de erosão do solo: uma aplicação por geoprocessamento no município de Volta Redonda/RJ, atribuiu à geomorfologia um peso de 30% na contribuição de processos erosivos, 25% ao tipo de solo, 20% à declividade e 15% ao tipo de uso e ocupação do solo e 10% à proximidade com áreas urbanas e estradas. Os mesmos autores concluíram que os fatores antrópicos induziram proliferação intensa de áreas com instabilidades ambientais naquela localidade.

Barbosa et al. (1998) citaram o uso de Operadores Zonais em álgebra de mapas como uma técnica de integração de dados básicos de várias fontes e formatos. Conforme os autores, uma parcela significativa dos projetos de aplicações ambientais de Geoprocessamento utiliza essa técnica, como os procedimentos metodológicos propostos pelo INPE e LAGET/UFRJ para ZEE-Zoneamento Ecológico-Econômico (Crepani et al., 1996) envolvendo o uso de imagens de satélite, mapas pedológicos, geológicos, de geomorfologia, de vegetação e de clima, para a geração de produtos intermediários, como cartas de vulnerabilidade à erosão e a integração dos dados do meio físico-biótico a dados socioeconômicos.

Dessa forma, esta pesquisa fez uso da ferramenta *Estatística Zonal* no SIG QGIS, de modo a calcular a média dos *pixels* dentro de cada um dos limites municipais (Figura 11). Para Barbosa et al. (1998), os operadores zonais são definidos sobre regiões específicas de um mapa de entrada, cujas restrições são fornecidas por outro mapa. Os autores citam o seguinte exemplo para uso do método: “dado um mapa de solos e um mapa de declividade da mesma região, obtenha a declividade média para cada tipo de solo”.

Observa-se que o município de Jaguaribara, localizado ao leste na região do médio Jaguaribe, apresenta o menor índice, provavelmente, por ter grande parte de sua extensão ocupada pelos terrenos planos associados ao leito do rio Jaguaribe, e o espelho de água pela barragem do Castanhão, que configura baixo nível de risco à erosão, visto que o leito do rio é o local aonde os sedimentos são depositados, reduzindo a média do município.

No entanto, vale ponderar que os ambientes fluviais são os que mais se notabilizam pela dinâmica natural, sobretudo através dos processos de intemperismo e erosão. Assim, é importante

frisar que, embutidos nos resultados, há especificidades em escalas mais ampliadas que precisam ser consideradas. Os municípios de Juazeiro do Norte e Cariri, localizados ao sul, na região do Cariri, apresentam elevados índices. Provavelmente, se dá pelo elevado nível de

antropização em Juazeiro e, em Cariri, pela grande declividade dos terrenos do município, que estão associados às vertentes da serra de São Pedro, situado na direção L-O ao longo da porção central do município.

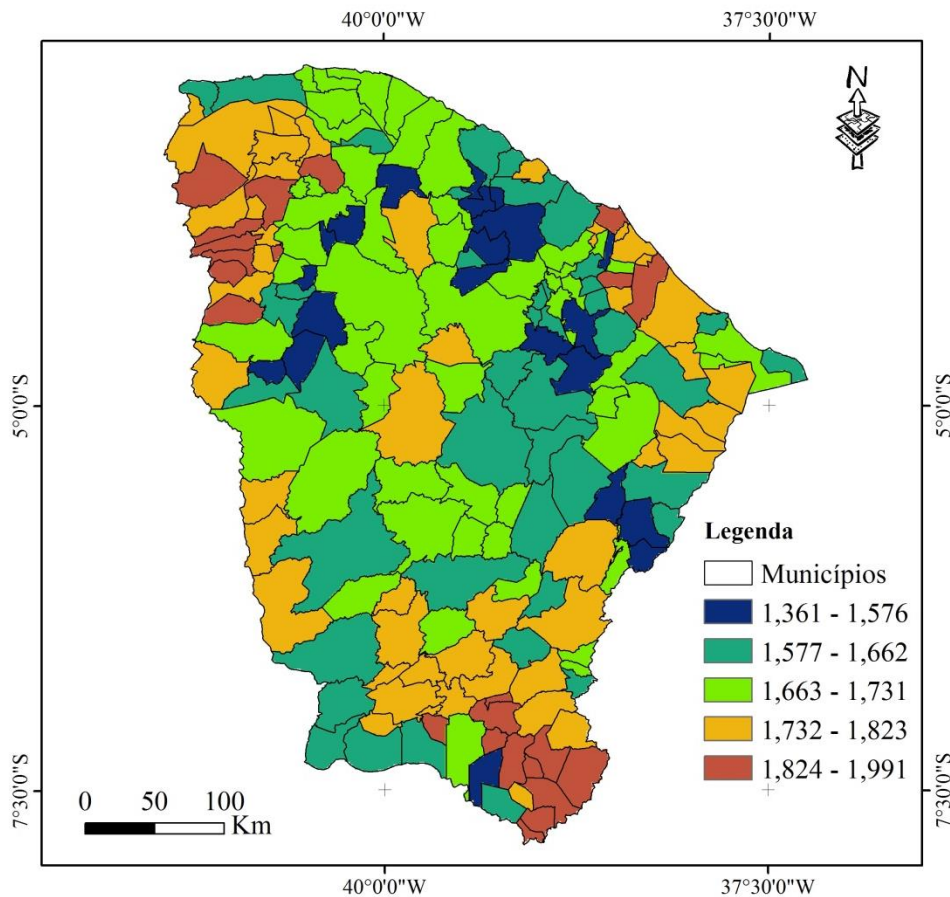


Figura 12. Média do índice de susceptibilidade à erosão de cada município, obtido por meio da Estatística Zonal, no Software QGIS.

Os municípios localizados nas regiões serranas do Baturité, Meruoca, Ibiapaba e Uruburetama – que podem ser identificadas no trabalho de Moro et al. (2015) – apresentam baixa vulnerabilidade à erosão, pois, nesta metodologia, assume-se maior peso ao elevado índice de vegetação.

Entretanto, esses lugares, apesar de sua flora diferenciada, também sofrem degradação ambiental - como erosão e deslizamentos - devido às ocupações antrópicas inadequadas. Conforme Silva et al. (2016), o maciço do Baturité sofre com o uso intenso e indiscriminado de seus recursos naturais e urbanização crescente e desordenada. De acordo com os mesmos autores, o monitoramento é imprescindível para a manutenção dos recursos e para a prevenção de desastres.

Como afirma Santos (2015), há uma tendência a intensificação as ocupações irregulares em áreas propensas a riscos, fortalecida pelas desigualdades sociais, que torna cada vez mais necessária a identificação de áreas mais vulneráveis a riscos.

Diversos estudos sobre erosão em áreas costeiras já foram desenvolvidos no estado do Ceará. Nesse sentido, Moraes et al. (2008), estudando as transformações na bacia de drenagem e os impactos no litoral, na costa setentrional do Nordeste Brasileiro, em especial no Ceará, destacaram que os processos erosivos ocorrem preponderantemente nas áreas adjacentes às desembocaduras fluviais.

Sampaio et al. (2016), estudando a susceptibilidade à erosão relacionada ao escoamento superficial na sub-bacia do Alto

Mundaú, localizada ao noroeste do Estado, concluíram que a análise integrada das condições fisiográficas da sub-bacia demonstraram uma forte susceptibilidade à erosão dos solos induzida por altas taxas de escoamento superficial.

Gonçalves e Nogueira (2007), elaborando mapa de predisposição à erosão na microbacia do rio Aracatiaçu – CE, localizada ao norte do Ceará, por meio da relação entre solo, declividade e vegetação, com uso de técnicas de geoprocessamento, identificaram que a predisposição no local é em geral baixa ou muito baixa. A área é característica de depressão Sertaneja, de baixa declividade, litologia resistente (cristalino 2) e constituída predominantemente por solos menos erodíveis, como o Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, de textura que varia de média a argilosa.

Cabral et al. (2016) avaliaram a susceptibilidade à erosão das terras do alto curso do rio Banabuiú, no sertão central do Ceará, usando lógica nebulosa. A área de estudo está situada no Sertão Central Cearense, inserida na bacia hidrográfica do rio Banabuiú, e compreendem os municípios de Pedra Branca, Senador Pompeu, Mombaça e Piquet Carneiro, perfazendo um total de aproximadamente 1490 km². Nesse estudo supracitado, utilizou-se dados de precipitação, declividade, pedologia e morfologia da superfície. Dessa forma, obteve-se que 3183 hectares (2,16%) considerados com risco nulo, 55290 hectares (37,5%) se classificam como risco ligeiro, 49610 hectares (33,64%) o risco é moderado, 12300 hectares (8,3%) risco forte, 15390 hectares (10,4%) são considerados risco muito forte, e 10900 hectares (8%) extremamente forte.

Moura et al. (2017) inferiram que o conhecimento da morfodinâmica da bacia e a sua classificação em unidades de paisagem de acordo com o grau de vulnerabilidade natural à perda de solo por erosão, pode fornecer subsídios ao Zoneamento Ecológico-Econômico.

O estado do Ceará possui uma grande diversidade de paisagens em seu território. As regiões de serras e com vegetação mais acentuada e preservada foram as que menos apresentaram susceptibilidade à erosão. A falta de cobertura vegetal é um grande agravador desse processo dentro do estado, associado às práticas agrícolas inadequadas e demais intervenções humanas que não são articuladas em prol do desenvolvimento sustentável e da conservação do meio ambiente.

Conclusões

O presente trabalho mensurou a vulnerabilidade à erosão no estado do Ceará por

meio de índice, produto da ponderação dos fatores ambientais envolvidos no processo. O índice obtido apontou valores entre aproximadamente 0,7 a 2,7, com média de 1,7. Sendo que, quanto maior o valor do índice maior o risco à erosão.

Ressalta-se que os valores encontrados nesse estudo por meio de índice, relativo à predisposição das áreas à erosão, não devem ser tomados como absolutos. Este trabalho propõe um modelo de estudo para áreas de interesse muito grandes, e serviu para apontar as características do estado de forma mais geral.

Faz-se importante ressaltar o ponto de vista da escala, pois em escala de detalhe, é provável haver uma diversidade maior de variáveis dentro das classes determinadas. Entende-se que a contribuição do estudo feito é, sobremaneira, de ordem metodológica, ao passo que estudos posteriores, feitos em escalas mais detalhadas, serão muito importantes.

Nesse estudo, os fatores declividade e índice de vegetação foram os principais levados em consideração (25% de peso para cada componente). Seguidos do tipo de uso e ocupação e erosividade das chuvas (15%). Os demais fatores possuem importância mas podem ser condicionados aos anteriores.

As áreas que apresentam maior vulnerabilidade foram aquelas com maior interferência antrópica e sem vegetação. Aquelas com maior índice de vegetação mantiveram-se baixas mesmo quando presentes em regiões serranas e declivosas.

Ademais, as ferramentas de SIG são instrumentos muito eficazes em análises ambientais desta natureza e podem ser utilizadas pelos órgãos competentes no planejamento e gestão ambiental.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo auxílio financeiro junto ao Edital de número 14/2011, processo nº: 483223/2011-5, à Embrapa Semiárido, e a Universidade Federal Viçosa - UFV.

Referências

- Allen, R. G., M Tasumi, R. Trezza, 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133, 380-394.
- Araújo, S. M. S, 2011. A Região Semiárida do Nordeste do Brasil: questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. *Revista Científica da FASETE* 5, 88-98

- Barbosa, C. C., Camara, G., Medeiros, J. S., Crepani, E., Novo, E. M. L. M., Cordeiro, J. P. C., 1998. Operadores zonais em álgebra de mapas e sua aplicação a zoneamento ecológico-econômico. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, IX.
- Batista, C., 2015. Avaliação do cálculo de erosividade em escala regional com o auxílio de geoprocessamento na Serra de Baturité-CE. *Revista de Geociências do Nordeste* 1, 22-36. *Agropecuária Brasileira* 38, 1017-1023.
- Brandão, R. L. Freitas, L. C. B., 2014. Geodiversidade do estado do Ceará. Fortaleza: CPRM. 214 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/113296/1/Geodiversidade-p37.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2020.
- Cabral, L. J. R. S., Valladares, G. S., de Aquino, R. P., 2016. Susceptibilidade à erosão das terras do alto curso do Rio Banabuiú, no sertão central do Ceará, usando lógica nebulosa. *Acta Geográfica Ed. Esp.* V CBEAGT, 103-113.
- Caldas, V. I. S. P., Silva, A. S., Santos, J. P. C., 2019. Suscetibilidade a Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica Lagos–São João, no Estado do Rio de Janeiro–Brasil, a partir do Método AHP e Análise Multicritério. *Revista Brasileira de Geografia Física* 12, 1415-1430.
- Carneiro, V. A., Paulo, P. O., Melo, E. M. L., 2014. Paisagens degradadas do município de Palmelo (Goiás): o estudo das voçorocas via trabalho de campo. *GeoTextos* 10, 179-207.
- Claudino-Sales, V., Lira, M. V., 2011. Megageomorfologia do noroeste do estado do Ceará. *Caminhos de Geografia* 12, 200–209.
- Coelho, V. H., Montenegro, S. M. G. L., Almeida, C. D. N., Lima, E. D., Ribeiro Neto, A., Moura, G. D., 2014. Dinâmica do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 18, 64-72.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/RedesInstitucionais/Rede-de-Bibliotecas---RedeAmetista/Canal-Escola/O-Intemperismo-e-a-Erosao1313.html>> Acesso em: 15 de maio de 2017.
- Crepani, E., Medeiros, J. S., Hernandez Filho, P., Florenzano, T. G., Duarte, V., Barbosa, C. C. F., 2001. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. São José dos Campos: INPE, 124 p.
- Dias, J. E., Gomes, O. V. O., Goes, M. H. B., 2012. Áreas de riscos de erosão do solo: uma aplicação por geoprocessamento. *Floresta e Ambiente* 8, 1-10.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1979. Súmula da X Reunião Técnica de Levantamentos de Solo (SNLCS, série Miscelânea). Rio de Janeiro.
- Fantinel, R. A., Benedetti, A. C. P., 2016. Avaliação dos fatores influentes na vulnerabilidade à erosão do solo por meio de decisão multicritério e de técnicas de geoprocessamento no município de Piratini-RS. *Ciência e Natura* 38, 156-163.
- Fantinel, R. A., Rosa, C. N., Trautenmüller, A. C., Fernandes, V. H., Benedetti, A.C.P., 2018. Mapeamento da vulnerabilidade à erosão do solo utilizando geoprocessamento: estudo de caso do município de Rolante-RS. *Estudos Ambientais: Avanços e Reflexões*. Capítulo XI, 164-178.
- FAO, ITPS. Status of the World's Soil Resources (SWSR)—Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy, v. 650, 2015.
- Gonçalves, F. C. A., Nogueira, J. F., 2007. Elaboração do mapa de predisposição à erosão na microbacia do rio Aracatiaçu (CE) utilizando técnicas de geoprocessamento (The generation of the erosion susceptibility map for Aracatiaçu Basin, in Ceará, Brazil). *Revista da Casa da Geografia de Sobral* 8, 81-93.
- Leite, M. L., Silva, I. N., Rodriguez, T., Marangon, M., Jeronymo, L., 2016. Erodibilidade de Solos Residuais do Cultural–Juiz de Fora. In *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*. Belo Horizonte.
- Lima, A. A. C., Oliveira, F. N. S., Aquino, A. R. L., 2002. Limitações do uso dos solos do Estado do Ceará por suscetibilidade à erosão. *Embrapa Agroindústria Tropical-Documentos (INFOTECA-E)*, 19p. *Agropecuária Brasileira* 38, 1017-1023.
- Listo, F. D. L. R., e Xavier, J. P. S., 2017. Carta de suscetibilidade a erosão do município de Aliança–PE a partir de análise multicritério. *Clio Arqueológica* 3, 180-200
- Lopes, J. W. B., de Araújo Neto, J. R., Pinheiro, E. A. R., 2015. Produção de sedimentos e assoreamento em reservatório no semiárido: o caso do açude Marengo, Ceará. *Geoambiente On-line* 24)
- Lopes, L. M., Veríssimo, S. F., da Silva Lima, M., Lima, T. R., 2018. Estudo comparativo de erodibilidade de solos do semiárido cearense por métodos indiretos. In *Anais do XIII*

- Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos I Partículas nas Américas.
- Makaya, N., Dube, T., Seutloali, K., Shoko, C., Mutanga, O., Masocha, M., 2019. Geospatial assessment of soil erosion vulnerability in the upper uMgeni catchment in KwaZulu Natal, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 112, 50-57.
- Morais, J. O., Pinheiro, L. S., Cavalcante, A. A., Paula, D. P., Silva, R. L., 2008. Erosão costeira em praias adjacentes às desembocaduras fluviais: O caso de Pontal de Maceió, Ceará, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada – Journal of Integrated Coastal Zone Management* 8, 61-76.
- Moreira, E. B. M., Soares, D. B., Ribeiro, E. P., Nóbrega, R. S., 2017. Suscetibilidade à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, Pernambuco. *Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento* 1, 4069-4080.
- Moro, M. F., Macedo, M. B., Moura-Fé, M. M. D., Castro, A. S. F., Costa, R. C. D., 2015. Vegetação, unidades fitoecológicas e diversidade paisagística do estado do Ceará. *Rodriguésia* 66, 717-743.
- Agropecuária Brasileira* 38, 1017-1023.
- Moura, M. M. S., de Araújo Neto, J. R., de Quiroz Palácio, H. A., Batista, F. J. A., de Sousa, M. M. M., 2017. Vulnerabilidade à erosão quanto aos aspectos solo e vegetação em uma bacia hidrográfica no semiárido. *Entorno Geográfico* 13, 100-113.
- Nascimento, M. D. J. L., de Deus, R. J. A., Leite, J. C., 2017. *Geomorphology Urban Platform for Media Sig: Monitoring Process Erosive Accelerated (Gully) Cemetery in Archaeological Indigenous Manaus. ITEGAM-JETIA* 3, 09-17.
- Nunes, A. B., Leite, E. F., 2017. Geoprocessamento aplicado ao estudo de caracterização física e ambiental da bacia hidrográfica do rio areias, no estado do Tocantins. *Espaço em revista* 19, 104-127.
- Oliveira, M. R., 2016. Perfil Geológico - Geomorfológico e de Montes Claros e susceptibilidades à erosão. In: *V Congresso em Desenvolvimento Social*.
- Régis Filho, D., 2008. Mapas temáticos interativos da bacia hidrográfica do rio Itacorubi Florianópolis - SC. 110 f. Monografia (Graduação em Geografia), Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Florianópolis.
- Ribeiro, A. S., Mincato, R. L., Curi, N., Kawakubo, F. S., 2016. Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica pelo processo analítico hierárquico. *Revista Brasileira de Geografia Física* 9, 016-031.
- Saaty, T. L., 1991. *Método de análise hierárquica*. São Paulo: Makron Books, 367p.
- Salazar, L. A. L., Quintero, A. F. C., 2015. Erosividad de la lluvia en la región cafetera de Quindío, Colombia. *Revista Cenicafé* 66, 25-31.
- Sales, M. C. L., 2015. Potencial de erosão das terras no núcleo de desertificação de Irauçuba estimada por meio dos parâmetros da EUPS. In: Oliveira, J. G. B., Sales, M. C. L. *Monitoramento da Desertificação em Irauçuba*. Fortaleza-CE: Imprensa Universitária da Universidade Federal do Ceará – UFC, 2015. 65-86.
- Sampaio, A. C. P., Cordeiro, A. M. N., de Holanda Bastos, F., 2016. Susceptibilidade à erosão relacionada ao escoamento superficial na sub-bacia do Alto Mundaú, Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* 9, 125-143.
- Santos, L. A. N., Nascimento, P.S.R., 2019. Espacialização da susceptibilidade erosiva a partir da densidade de drenagem pelo interpolador Kernel. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* 14.
- Silva, A., Schulz, H. E., Camargo, P. B. *Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias hidrográficas*. São Carlos: Rima Editora, 2003.
- Silva, G. C., Santos, F. J. C., Duarte, C. R., Souto, M. V. S., 2016. Levantamento da Susceptibilidade a Erosão, Escorregamentos e/ou Movimentos de Massa na APA da Serra do Baturité - CE a Partir do Emprego de Dados SRTM e Imagens Landsat 8. *Geologia* 29, 147-160.
- Smith, K. “Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster”, Routledge, New York, 59 pp., 2004.
- Sobrinho, J. F., 2015. Precipitação e erosão do solo na Serra das Matas no ambiente do semiárido cearense. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista* 11.
- Sousa, F. R. C., Paula, D. P., 2019. Análise de perda do solo por erosão na bacia hidrográfica do rio Coreaú (Ceará - Brasil). *Revista Brasileira de Geomorfologia* 20.
- Souza, M. J. N., 2007. Compartimentação geoambiental do Ceará, 127-140. In: Silva, J. B., Cavalcante, T. C., Dantas, W. C. (Orgs). *Ceará: um novo olhar geográfico*. 2. ed. Fortaleza: Edições Demócrito Rocha. 480p.
- Stead, Jean Garner, Stead, W. Edward., 2015. *Management for a small planet*. Routledge.
- Vanzela, L. S., Hernandez, F. B., Franco, R. A. M., 2010. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Corregó Três Barras,

- Marinópolis. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 14, 55-64.
- Vital, S. R. O., Girão, O., 2015. Análise da suscetibilidade da paisagem à erosão na bacia do alto curso do rio Taperoá (PB). Revista OKARA: Geografia em debate 9, 4-25.
- Zanchin, M., Leandro, D., Quadro, M. S., Ceconello, S. T., Nadaleti, W. C., Castro, A. S., 2018. Comparação de mapeamentos do uso da terra por técnicas de geoprocessamento no município de São Lourenço do Sul/RS. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais 9, 319-329.