



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Vulnerabilidade à perda de solos no município de Lucena-PB: avaliação para os anos de 2018 a 2040

Tarciso Cabral da Silva¹, Ivanhoé Soares Bezerra²

Prof. Titular da Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. E-mail: tarcisocabral@gmail.com (correspondente). <https://orcid.org/0000-0002-1824-4527>
Bacharel em Geografia, Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental, Doutor em Engenharia Civil e Ambiental pelo PPGECA/CT/UFPB. E-mail: ivanhoe.bezerra@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-6688-4799>

Artigo recebido em 26/01/2023 e aceite em 14/04/2023

RESUMO

A dinâmica na mudança da ocupação do território do município de Lucena, na zona costeira do estado da Paraíba, associadas às características naturais suscitou a necessidade de um entendimento mais completo dos graus de vulnerabilidade aos processos erosivos aos quais essa região se encontra submetida. Assim, foi realizada uma avaliação espacial e quantitativa da vulnerabilidade à perda do solo, considerando a evolução do uso e ocupação do solo (UOS) entre os períodos de 2018 e futuros, de 2030 e 2040, estes últimos obtidos por simulação por meio do LCM (Land Change Modeler). A definição dos cenários de perda de solo se pautou no método de análise multicritérios, considerando os temas: UOS, pedologia, geologia, geomorfologia e climatologia, integrando um método usado para determinação dos valores de cada temática em função da relação existente entre o processo de pedogênese e morfogênese. Também é utilizado o Processo hierárquico analítico (AHP) para a hierarquização das variáveis e consequente definição do modelo de vulnerabilidade à perda do solo. Os resultados indicaram que a forma do relevo e as características climáticas favorecem a estabilidade dos processos erosivos e o UOS a vulnerabilidade. Quanto à vulnerabilidade à perda do solo, o tema UOS foi o que exerceu a maior influência, e o clima apresentou a menor contribuição. As áreas com maior predominância foram as enquadradas como medianamente estável/vulnerável, com cerca de 55% do território municipal. Concluiu-se que ocorre um equilíbrio entre os processos de pedogênese e morfogênese, sem mudanças dos níveis de vulnerabilidade no período estudado.

Vulnerability to soil loss in the municipality of Lucena-pb: evaluation for the years 2018 to 2040

ABSTRACT

The dynamics in changing occupation of the territory of the municipality of Lucena, in the coastal zone of the Paraíba state, associated with natural characteristics, raised the need for a more complete understanding of the degrees of vulnerability to erosive processes to which this region is subjected. Thus, it was carried out a spatial and quantitative assessment of the vulnerability to soil loss, considering the evolution of land use and occupation (UOS) for the periods of 2018, 2030 and 2040, these ultimates obtained by simulation using LCM (Land Change Modeler). The definition of the soil loss scenarios was based on the multi-criteria analysis method, considering the themes: land use and land cover, soil, geology, geomorphology and climatology integrating a method used to determine the values of each theme according to the relationship between the process of pedogenesis and morphogenesis. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is also used for the hierarchization of variables and the consequent definition of the vulnerability model to soil loss. The results indicated that the shape of the relief and the climatic characteristics favored the stability of the erosive processes, and the UOS the vulnerability. Regarding the model of vulnerability to soil loss, the theme UOS exerted the greatest influence, while the climate presents the least contribution. The areas with the greatest spatial representativeness were those classified as moderately stable/vulnerable, corresponding to approximately 55% of the municipality area. It was concluded that there is a balance between pedogenesis and morphogenesis processes, without changes in vulnerability levels during the study period.

Introdução

A diversidade de usos observados na Zona Costeira, a dinâmica na mudança da ocupação do território e a importância decorrente da concentração populacional, que historicamente ocorre nessas regiões, suscita a necessidade de um entendimento mais completo dos graus de vulnerabilidade à perda do solo aos quais esta região se encontra submetida.

A avaliação da vulnerabilidade é uma abordagem holística que deve considerar alguns elementos: i) Dimensão social: análise do bem estar humano que sofrerá danos em função das características dos sistemas sociais e coletivos; ii) Dimensão econômica: danos aos ativos e interrupção da capacidade produtiva, com consequente perda do valor econômico; iii) Dimensão física: danos as infraestruturas, áreas edificadas e espaços abertos; iv) Dimensão cultural: consequências aos bens intangíveis e seus significados para a sociedade; v) Dimensão ambiental: consequências para os ecossistemas e suas funções ecológicas, vi) Vulnerabilidade institucional: danos potenciais aos sistemas de governança, forma e funções organizacionais em função de mudanças que necessitem ser realizada devidos as fraquezas expostas. (Lavell, 2012).

Birkmann et al. (2013) visando desenvolver uma metodologia de análise da vulnerabilidade, que vise uma gestão mais eficaz, afirma que essa tem que apresentar caráter multifacetado, sendo necessário considerar alguns fatores como a exposição, a suscetibilidade, a falta de resiliência, assim como as diversas dimensões temáticas (física, social, ecológica, econômica, cultural e institucional).

Para Ferretti e Montibeller (2017), a análise da vulnerabilidade, como subsidio para a

tomada de decisão, fornece uma estrutura conceitual que possibilita a avaliação de alternativas a ocupação do solo.

Uma das questões que dificultam o gerenciamento da ocupação do espaço está na definição de quanto uma área é vulnerável quando comparada com outra de características semelhantes, mas cujos fatores tecnológicos, sociais e culturais que incidem sobre estas são distintos. Esse cenário faz com que a função vulnerabilidade sofra alteração, sendo necessário incorporar a sua metodologia essas incertezas (Cardona, Ordaz, Marulanda, Carreño, & Barbat, 2010).

As avaliações de áreas vulneráveis, consistem no cruzamento de um grande número de variáveis. Diante disso, ao longo do tempo uma série de metodologias foram sendo desenvolvidas, se obtendo resultados sob as mais variadas perspectivas e aplicações.

Rahman, Shi, Chongfa e Dun (2015), considerando que a erosão do solo é um dos principais problemas ambientais, uma vez que esse atinge a qualidade da água e da terra colocando em risco a sustentabilidade humana, desenvolveu um modelo de avaliação de vulnerabilidade à perda de solo baseada em sensoriamento remoto, SIG e análise espacial dos componentes principais, estabelecendo com isso o Índice de risco de erosão do solo (SEHI). Essa metodologia permitiu mensurar cinco níveis de risco à erosão.

Li, Zhou, Tian, Kuang e Wang (2015), visando avaliar o risco de erosão costeira no Delta do Yangtze, na China, incorporou o processo hierárquico analítico (AHP, em inglês) como ferramenta para correlação multicritério, o que possibilitou considerar indicadores de vulnerabilidade e indicadores de impactos

correspondentes a aspectos físicos e socioeconômicos.

Huang, Huang, Peng e Lu (2016), objetivando caracterizar o risco a erosão em Chahe, Guizhou, sudoeste da China consideraram fatores como intensidade pluviométrica, cobertura vegetal, declividade, cobertura do solo e tipo do solo, combinando dados espaciais de quatro anos distintos a partir de técnicas de sensoriamento remoto e SIG. Para normalização dos fatores o método utilizado foi o método Rank Sum, que estabelece a relação entre o peso individual de cada fator e soma de todos os pesos. Os fatores de erosão foram ranqueados em função da sua capacidade de influenciar a ocorrência local de erosão, permitindo assim definir um índice de erosão que considera todos os fatores e seus respectivos pesos.

Ştefan et al. (2017) buscaram modelar os níveis de vulnerabilidade da região de Maramures, na Romênia, a partir da correlação de dois processos geológicos, os deslizamentos e a erosão, tomando como base a metodologia USLE e um modelo quantitativo baseado nas características morfométricas do território, tendo, em seguida, comparado as classes de vulnerabilidade ao tipo de solo. Por fim realizaram a comparação das classes de exposição com o valor monetário das áreas mapeadas. Essas análises possibilitaram estabelecer que a questão geomorfológica impacta diretamente na questão econômica de cada região administrativa.

Ozsahin, Duru e Eroglu (2018) utilizaram uma das metodologias qualitativas mais consolidadas para avaliação de áreas vulneráveis, a Equação Universal de Perdas de Solo (USLE), que permite calcular as taxas de erosão médias anuais por unidade de área. A metodologia foi aplicada a bacia hidrográfica do Maritsa e fez uso de imagens

de satélite para uma análise temporal das mudanças da cobertura do solo e como essa mudança repercutiu nas taxas erosivas ao longo dos anos.

Woldemariam, Iguala, Tekalign e Reddy (2018) utilizaram a metodologia USLE para estimar as perdas de solo na região de Hararghe, na Etiópia. A essa técnica, associaram a análise do NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada), uma análise temporal do uso e ocupação do solo e regras de decisão multicritérios, concluindo que em um período de 16 anos cerca de 80% da área analisada manteve suas taxas de perda de solo anuais.

O modelo USLE vem amplamente sendo utilizado na estimativa das perdas de solo conforme se observa em Endalew e Biru (2022), Castro, Alves, Marcionilio, Moura e Oliveira (2022) e Joshi et al. (2023). Alguns trabalhos têm associadas a metodologia USLE a redes neurais artificiais (Senanayake & Pradhan, 2022) de modo a avaliar a perda dos solos e processos erosivos, obtendo modelos consistentes e robustos.

Conforme se pode observar, o processo de erosão do solo tem sido um dos principais problemas ambientais em várias partes do mundo e sua análise utilizando geotecnologias e AHP tem sido amplamente utilizada, como se observa nos estudos desenvolvidos por Hembram e Saha (2018) que usaram essa metodologia associada às características morfométricas da bacia hidrográfica para a avaliação da perda do solo por processos erosivos na bacia hidrográfica do rio Jainti, no oeste da Índia; Haidara, Tahri, Maanan e Hakdaoui (2019) que avaliaram a perda do solo para a bacia hidrográfica do Guelmim, no Marrocos, tomando como base critérios como intensidade pluviométrica, cobertura do solo, classificação do solo, declividade e densidade de drenagem;

Makaya et al. (2019) estudando a bacia hidrográfica do uMgeni na África do Sul, que usaram a AHP para calcular os pesos normalizados para os fatores que influem no processo erosivo; e Das et al. (2020) integraram a metodologia USLE, AHP e tecnologias geoespaciais para modelar a perda do solo na zona oeste da bacia hidrográfica de Kameng, no nordeste da Índia. Raj, Kumar e Sooryamol (2022) utilizaram o método AHP para mapeamento da vulnerabilidade à perda de solo traçando cenários para cenários climáticos futuros até 2080.

A análise da vulnerabilidade à perda do solo auxilia no planejamento da ocupação espacial, principalmente nas regiões que apresentam um grande desenvolvimento econômico e social, como é o caso do município de Lucena, no estado da Paraíba, que está inserida na Zona Costeira e que ao longo dos anos apresentou uma dinâmica significativa no uso e ocupação do solo.

A perda do solo é um dos principais problemas observados nas áreas de produção agrícola, trazendo uma série de perdas econômicas e consequências ambientais. O acompanhamento deste processo no município de Lucena, no estado da Paraíba, cuja base econômica ainda é atividade agrícola e a sua projeção para as próximas décadas é fundamental para um planejamento a longo prazo e implantação de medidas que venham a mitigar os danos.

Parte-se do pressuposto que a dinâmica do uso e ocupação observada até o ano de 2018 no município de Lucena-PB, se mantida até o ano de 2040, tornará a área de mais vulnerável a perda de solo, logo com maiores problemas ambientais e econômicos. Pandey, Kumar, Nautiyal e Panwar (2021) e Kumar et al. (2023), consideram que a perda do solo é um dos fatores mais críticos e

afetam negativamente o ambiente e a economia, sendo necessário montar estratégias para conservação do ambiente.

Tomando como base a dinâmica espacial do território do município de Lucena-PB, é desenvolvido, neste estudo, uma avaliação espacial e quantitativa da vulnerabilidade à perda do solo, considerando a evolução do uso e ocupação do solo para os períodos de 2018, e futuros de 2030 e 2040, a partir da determinação dos critérios que exercem influência sobre os processos erosivos na região. Os cenários futuros foram obtidos por meio de uma análise preditiva obtida de simulações com o LCM (Land Change Modeler).

Material e métodos

Caracterização da área em estudo

O município de Lucena (Figura 1), na Região Geográfica Intermediária de João Pessoa no estado da Paraíba, está inserido entre os paralelos de 6°50' S e 7°00" S e os meridianos de 34°50' O e 35°00' O. Limita-se a Norte com o município de Rio Tinto pelo talvegue do rio Miriri, a Leste com o Oceano Atlântico, a Sul com os municípios de Santa Rita e Cabedelo pelo rio Soé, e a Oeste com o município de Santa Rita por divisas secas.

O município de Lucena, no estado da Paraíba, em termos geológicos se classifica como pertencente a era cenozoica, onde se observa de maneira bem definida três períodos: o Paleogeno (mais antiga, com idades entre 65 a 23 milhões de anos), o Neogeno (idades entre 23 a 3 milhões de anos) e o Quaternário (de 3 milhões até o período atual). No que tange aos aspectos geomorfológicos, abrange as unidades geoambientais dos Tabuleiros

Costeiros e a Planície Litorânea (Furrier, Araújo, & Meneses, 2006).

Em termos de solos, predominam aqueles caracterizados como espodossolos e argissolos, ocorrendo preferencialmente na região dos Tabuleiros Costeiros, os organossolos e neossolos são observados mais a leste, na região da planície litorânea (Santos; Zaroni & Clemente, 2018).

Em relação às condições climáticas, o regime pluviométrico se define pela existência de duas estações bem definidas, a seca, que se estende do mês de setembro a fevereiro e a chuvosa, de março a agosto, com precipitação média próxima a 1460 mm. A distribuição de chuvas não é constante, o que faz com que os meses de outubro a dezembro sejam os mais secos e os de maio a junho os mais chuvosos. Ao classificar a região em função de Köppen, verifica-se que a área está enquadrada na categoria As, clima tropical com estação de seca no verão. A temperatura média na

região é de 25 °C, com umidade relativa do ar média próxima a 80% e pressão de 998,3 hPa.

A vegetação da região pode ser caracterizada em duas grandes categorias, a Floresta Estacional Semidecidual (Floresta Tropical Subcaducifólia) e Savana/Floresta Estacional, ambas inseridas no Bioma Mata Atlântica, onde é possível observar algumas fitofisionomias como vegetação de restinga herbácea e arbustiva, vegetação de tabuleiro, vegetação estuarina arbórea (manguezais), vegetação ripária arbustiva (aninga) (Brasil, 2006).

O uso e ocupação do solo se caracteriza pela predominância de atividade agrícolas, como o da cana-de-açúcar e do coco-da-baía na região dos tabuleiros costeiros e pela ocupação urbana na região da planície litorânea, onde ocorre o maior adensamento populacional.

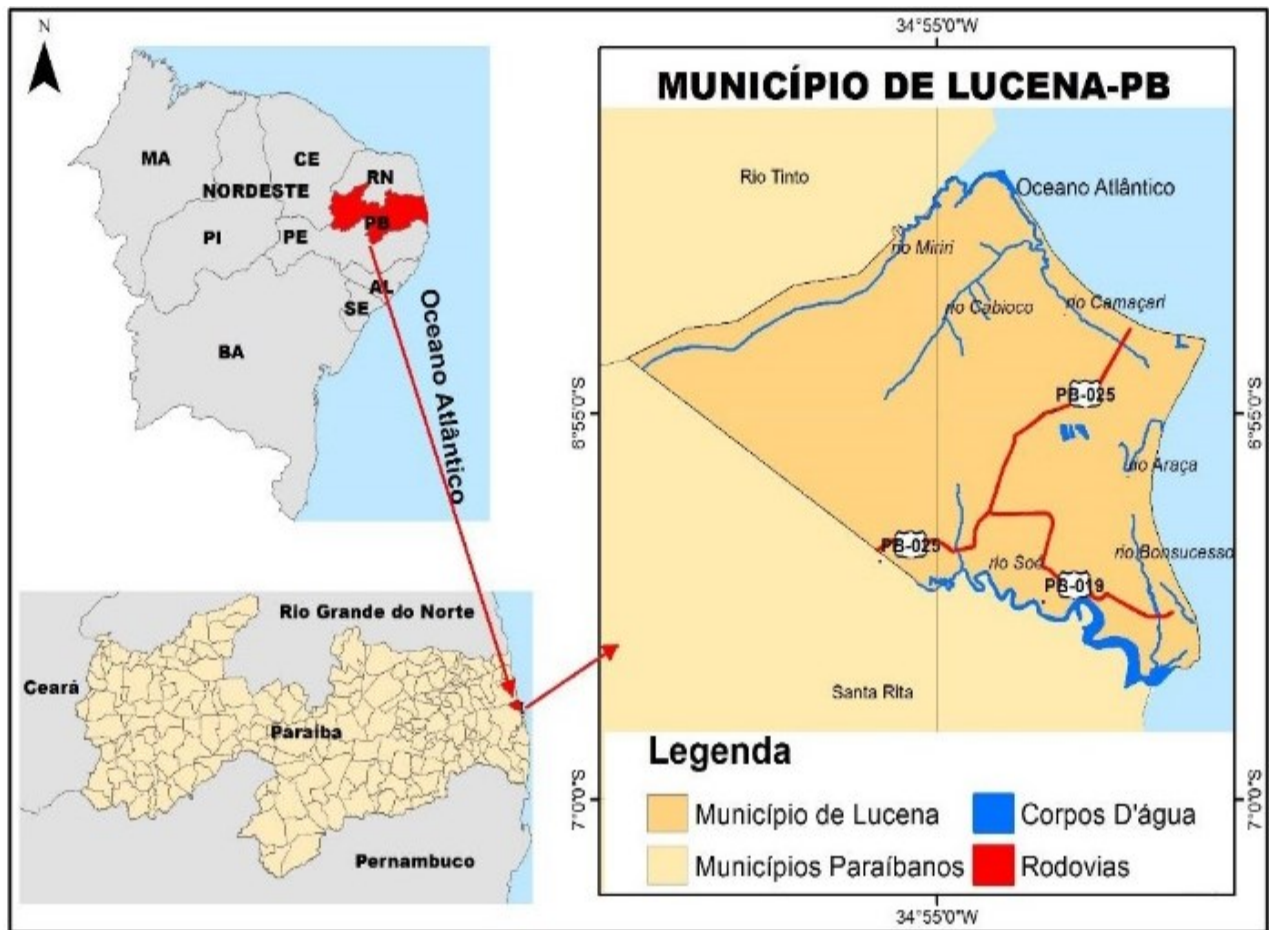


Figura 1. Mapa de localização do município de Lucena-PB.

Procedimentos Metodológicos

A metodologia utilizada contempla a análise da vulnerabilidade à perda do solo, estruturada em três etapas: i) o diagnóstico ambiental com ênfase nos temas geologia, geomorfologia, pedologia, climatologia e uso e ocupação do solo; ii) a proposição e validação de um modelo que integra a proposta de Crepani et al. (2001) com o método AHP; e iii) a simulação de cenários de vulnerabilidade à perda do solo para os anos de 2018, 2030 e 2040 e posterior construção de quadros evolutivos 2018-2030 e 2030-2040.

A análise dos cenários de perda de solo por processos erosivos (Figura 2) se pautou no método de análise multicritérios, considerando os temas

que mais influenciam a perda do solo: uso e ocupação do solo (UOS), pedologia (PED), geologia (GEOL), geomorfologia (GEOM) e climatologia (CLIM).

Para definição dos cenários de perda de solo utilizou-se o uso e ocupação do solo do município de Lucena-PB para o ano de 2018, além dos anos de 2030 e 2040 segundo as previsões do UOS realizadas por Bezerra e Silva (2022); os dados relativos a geologia e pedologia foram obtidos juntos a Agência Executiva de Gestão das Águas (AESAs); a geomorfologia foi gerada a partir de dados topográficos da região (Cartas da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE) ; e a climatologia, que no modelo de Crepani et al. (2001) é representado pela

intensidade pluviométrica, do Plano Diretor de Recursos Hídricos do estado da Paraíba (PERH, 2003). Estes dados foram integrados em ambiente

SIG (Sistema de Informação Geográfico) em uma escala de mapeamento de 1:100.000.

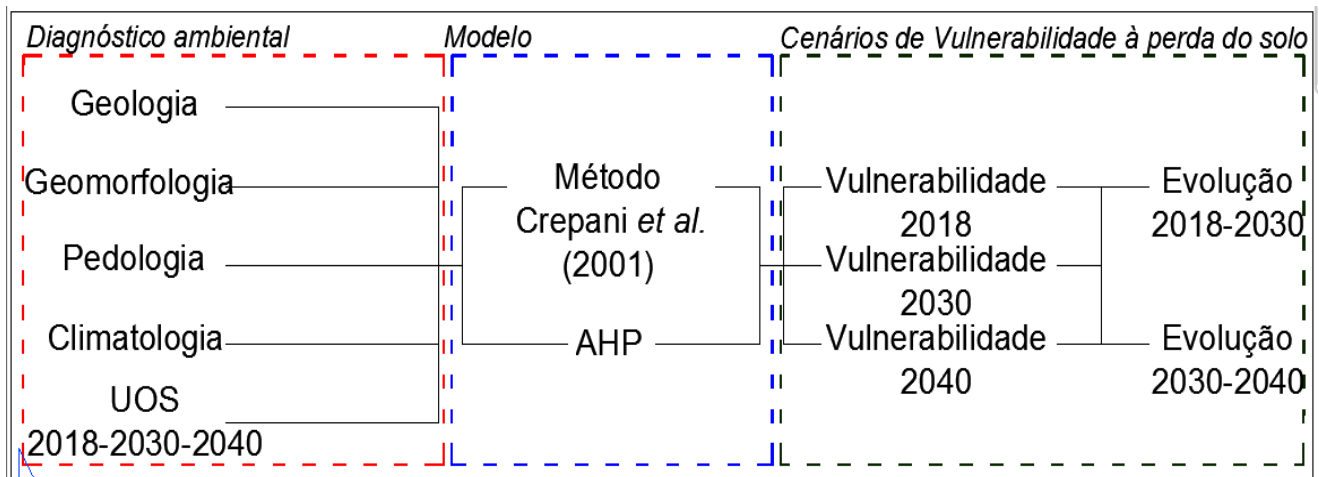


Figura 2. Fluxograma do processo de análise da vulnerabilidade à perda do solo

A análise da vulnerabilidade à perda do solo pautou-se no conceito de Unidade de Paisagem Natural e integrou dois métodos: o proposto por Crepani et al. (2001), que permitiu determinar os valores das características de cada temática em função da relação existente entre o processo de pedogênese e morfogênese, atribuindo valores entre 1 (onde predomina a pedogênese) e 3 (onde predomina a morfogênese); e o AHP (processo hierárquico analítico) para a hierarquização das variáveis e consequente

definição do modelo de vulnerabilidade à perda do solo.

Para a utilização do método AHP foi necessário que os valores que caracterizavam os atributos fossem normalizados em uma escala de 0 a 1, para esse fim foi utilizada a conversão proposta por Oliveira, Rodrigues, Alves Sobrinho e Panachuki (2009), conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1: Escala de conversão de vulnerabilidade

Vulnerabilidade	Intervalo Crepani et al. (2001)	Intervalo normalizado
Estável	1,00 – 1,35	0,00 – 0,07
Moderadamente estável	1,35 – 1,75	0,07 – 0,31
Moderadamente estável/vulnerável	1,75 – 2,25	0,31 – 0,69
Moderadamente vulnerável	2,25 – 2,65	0,69 – 0,93
Vulnerável	2,65 – 3,00	0,93 – 1,00

Fonte: Adaptado de Oliveira, Rodrigues, Alves Sobrinho e Panachuki (2009).

A determinação dos pesos do modelo de vulnerabilidade à perda do solo foi realizada a partir da aplicação da AHP proposta por Saaty (1994). Inicialmente construiu-se uma matriz de comparação paritária entre os itens do nível inferior e o dos níveis imediatamente superior. Em seguida foi realizada a análise aos pares de cada alternativa, tomando como base a escala de importância apresentada no Quadro 2.

Para avaliar o resultado das análises foi necessário calcular o Índice de Consistência (IC) e a Taxa de Consistência (TC). Para a determinação do Índice de Consistência (IC) se utilizou a Equação 1.

$$IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

Onde:

IC = Índice de consistência;

$\lambda_{\max}$ = Autovetor da matriz (número de Eigen);

n = número de critérios da matriz

Taxa de Consistência (TC) foi determinada pela razão entre o Índice de consistência (IC) e o Índice Randômico (IR) conforme a equação 2. A matriz será considerada consistente se o resultado obtido for igual ou menor que 0,1, logo os coeficientes foram utilizados no modelo de vulnerabilidade à perda de solo.

$$TC = IC / IR \quad (2)$$

Onde:

TC = Taxa de Consistência

IC = Índice de consistência;

IR = Índice Randômico, conforme o Quadro3.

Quadro 2. Escala de comparação AHP

Intensidade da importância	Descrição
1	Importância igual
2	Importância igual/moderada
3	Importância moderada
4	Importância moderada/forte
5	Importância forte
6	Importância forte/muito forte
7	Importância muito forte
8	Importância muito forte/extrema
9	Importância extrema

Quadro 3. Índice Randômico

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Os coeficientes resultantes da matriz, que correlacionam os elementos estudados, passam a descrever o nível de vulnerabilidade conforme apresentado na Equação 3.

$$\text{Vuln} = \text{C}_1.\text{UOS} + \text{C}_2.\text{PED} + \text{C}_3.\text{GEOL} + \text{C}_4.\text{GEOM} + \text{C}_5.\text{CLIM} \quad (3)$$

Onde:

Vuln = Vulnerabilidade à perda de solo

UOS = vulnerabilidade ao tema uso e ocupação do solo

PED = vulnerabilidade ao tema solos

GEOL = vulnerabilidade ao tema geologia

GEOM = vulnerabilidade ao tema geomorfologia

CLIM = vulnerabilidade ao tema clima

Resultados e discussão

Vulnerabilidade à perda de solo para os temas básicos

A análise dos temas básicos (Figura 3) permitiu identificar como as características naturais (solo, geologia, clima e geomorfologia) e sua relação com as antrópicas (uso e ocupação do solo) interferem na vulnerabilidade à perda de solo no município de Lucena, favorecendo a ocorrência dos processos de pedogênese e morfogênese. Logo, a estabilidade ou vulnerabilidade à perda do solo.

Os solos que ocorrem no município de Lucena são enquadrados como argissolos, espodossolos, neossolos e organossolos. Os argissolos e os espodossolos se enquadram na categoria medianamente estável/vulnerável ocorrendo ao longo da região do Tabuleiros

Costeiros. Os solos, neossolos e organossolos que ocorrem ao longo da Planície Costeira e das planícies fluviais, se mostram susceptíveis aos processos erosivos, o que os permitem enquadrar na categoria de vulnerável.

No que tange ao tema geologia, se observou a ocorrência de formações de três períodos distintos: o cretáceo, o neógeno e quaternário. A litologia observada se caracteriza pela presença de calcário, arenito, argila e sedimento aluvionar. As regiões onde se observam a presença de arenitos são classificadas como moderadamente vulnerável, enquanto a presença dos demais litotipos atribuem uma característica de vulnerável à perda de solo.

A vulnerabilidade ao tema geomorfologia indica uma tendência a estabilidade. As estruturas geomorfológicas observadas na região, tais como o relevo plano a suave ondulado e interflúvios planos tendem a não favorecer os processos erosivos. No entanto, verificou-se, em menor escala, áreas classificadas como moderadamente vulnerável, estando estas localizadas nas encostas dos vales.

A questão climática e sua influência nos processos erosivos foi analisada a partir da intensidade pluviométrica mensal. O município de Lucena não apresenta uma variabilidade espacial significativa da intensidade pluviométrica, sendo observada uma média histórica dos meses chuvosos de 271 mm/mês, além de que, com base em estudos recentes, ficou demonstrado que não há tendências estatisticamente significativas das séries pluviométricas anuais e das médias da quadra chuvosa (Malzac, 2019) para a zona costeira do estado da Paraíba, o que permite enquadrar a vulnerabilidade a esse tema como medianamente estável/vulnerável.

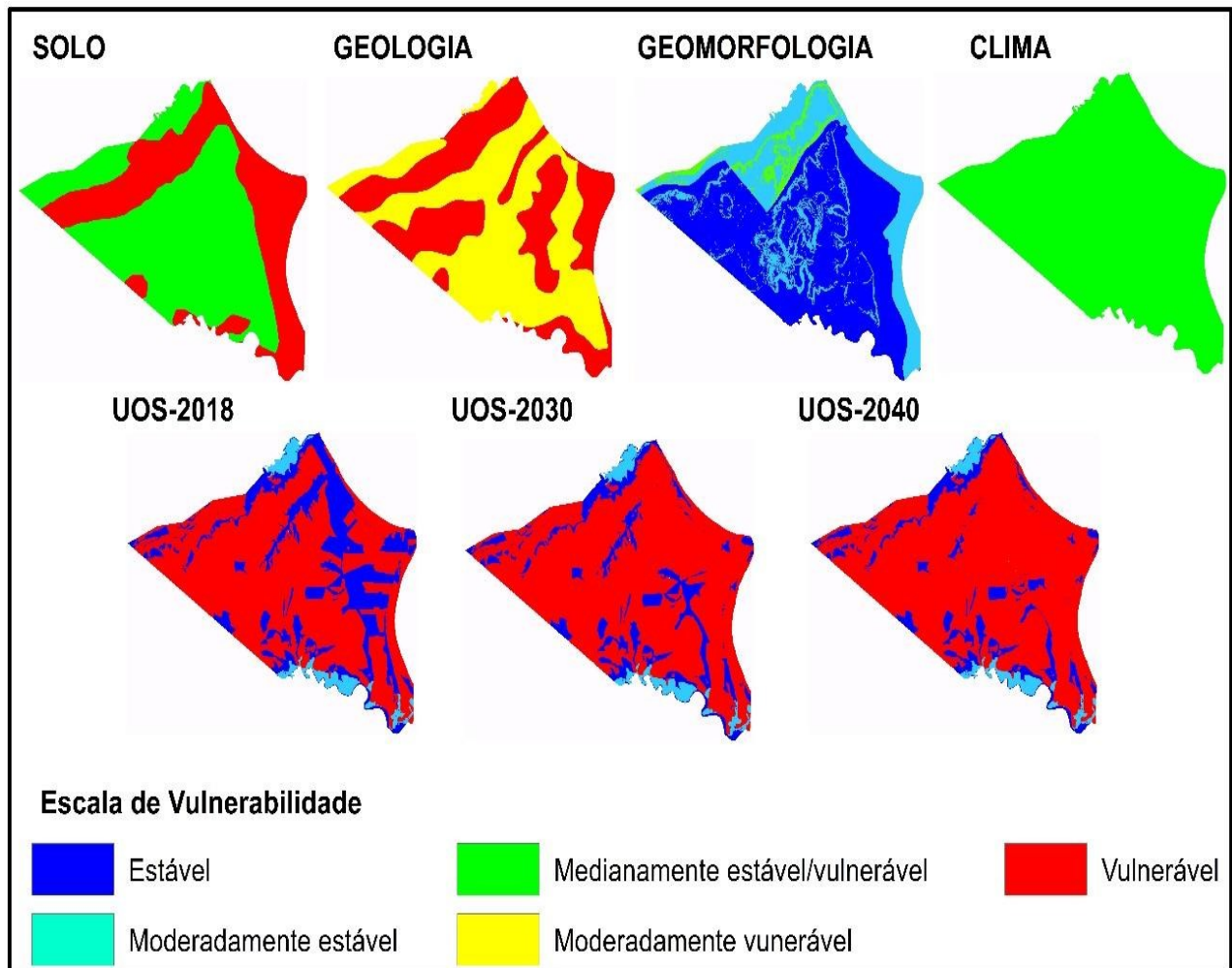


Figura 3. Vulnerabilidade à perda de solo para os temas básicos

No que tange à vulnerabilidade à perda do solo devido ao tema uso e ocupação do solo, independente do ano analisado, as áreas onde se observam a presença das atividades agrícolas (cana-de-açúcar e coco-da-baía) e áreas urbanizadas são as que apresentam os maiores níveis de vulnerabilidade, enquanto as áreas onde se observam a presença da vegetação de Mata Atlântica e os manguezais são os que menos favorecem os processos erosivos, logo são mais estáveis à perda do solo. Verificou-se ainda que a evolução do uso do solo, com a substituição da vegetação de Mata Atlântica por áreas urbanas tende a ampliar os níveis de vulnerabilidade na planície costeira.

As práticas agrícolas, em vários estudos (Endalamaw, Moges, Kebede, Alehegn, & Sinshaw, 2021; Bag et al., 2022, Lopes et al. 2022; Makhtoumi, Abbasi, Seyedmakhtoom, Ibeanusi & Chen, 2023; Olike, Fikadu & Gedefa, 2023, Xia & Zhai., 2023) tem se mostrado como o principal responsável pelo aumento da vulnerabilidade a perda do solo, sendo necessário a implantação e desenvolvimento de políticas que proporcionem um uso mais sustentável do solo.

Modelo de vulnerabilidade à perda do solo para o município de Lucena

A construção do modelo de vulnerabilidade à perda do solo para o município de Lucena foi pautada na utilização do método AHP a qual possibilitou a determinação dos coeficientes para cada temática utilizada conforme apresentado no Quadro 4.

A análise da taxa de consistência (TC) obteve um valor de 0,02, ou seja, inferior ao limite

máximo de 0,10, o que indicou que a categorização dos dados foi coerente.

Os pesos obtidos indicam o grau de influência de cada atributo nos processos erosivos para o município de Lucena, onde o fator uso do solo é aquele que mais contribui para as perdas de solo, enquanto a questão climática é a que menos influência.

Quadro 4. Coeficientes do modelo de vulnerabilidade à perda do solo para o município de Lucena

Tema	Coeficiente
Uso e ocupação do solo	0,395
Solo	0,215
Geologia	0,215
Geomorfologia	0,119
Clima	0,056

Análise da vulnerabilidade à perda do solo para os anos de 2018, 2030 e 2040

O estudo da evolução da vulnerabilidade à perda do solo para os anos de 2018 a 2040 permitiu identificar os níveis de estabilidade/vulnerabilidade a qual o município de Lucena-PB está sujeito e prever o comportamento dos processos erosivos em função das alterações do uso e ocupação do solo (Figura 4).

As áreas com maior representatividade espacial em todos os cenários analisados são aquelas enquadradas como medianamente estável/vulnerável, onde ocorre um equilíbrio entre os processos de pedogênese e morfogênese, correspondendo, nos três períodos, a cerca de 55% do território do município de Lucena. Estas estão localizadas nas regiões dos tabuleiros costeiros

onde se desenvolvem as atividades agrícolas com destaque para a cultura da cana-de-açúcar e coco-da-baía.

As regiões enquadradas como moderadamente vulneráveis, ou seja, aqueles cujos processos de morfogênese são mais efetivos, tendem a ter uma ampliação de aproximadamente 22,23% entre os anos de 2018 e 2040. Estas se localizam ao longo da planície costeira e das planícies de inundação dos corpos d'água.

Em processo de redução observou-se as áreas mapeadas como moderadamente estáveis, nas quais os processos de pedogênese prevalecem, e que no período de 2018 a 2040 tendem a sofrer uma redução de 38,07%. Estas áreas se correlacionam com as áreas ocupadas com vegetação do tipo Mata Atlântica e que apresentam tendência de substituição por culturas agrícolas ou áreas urbanas

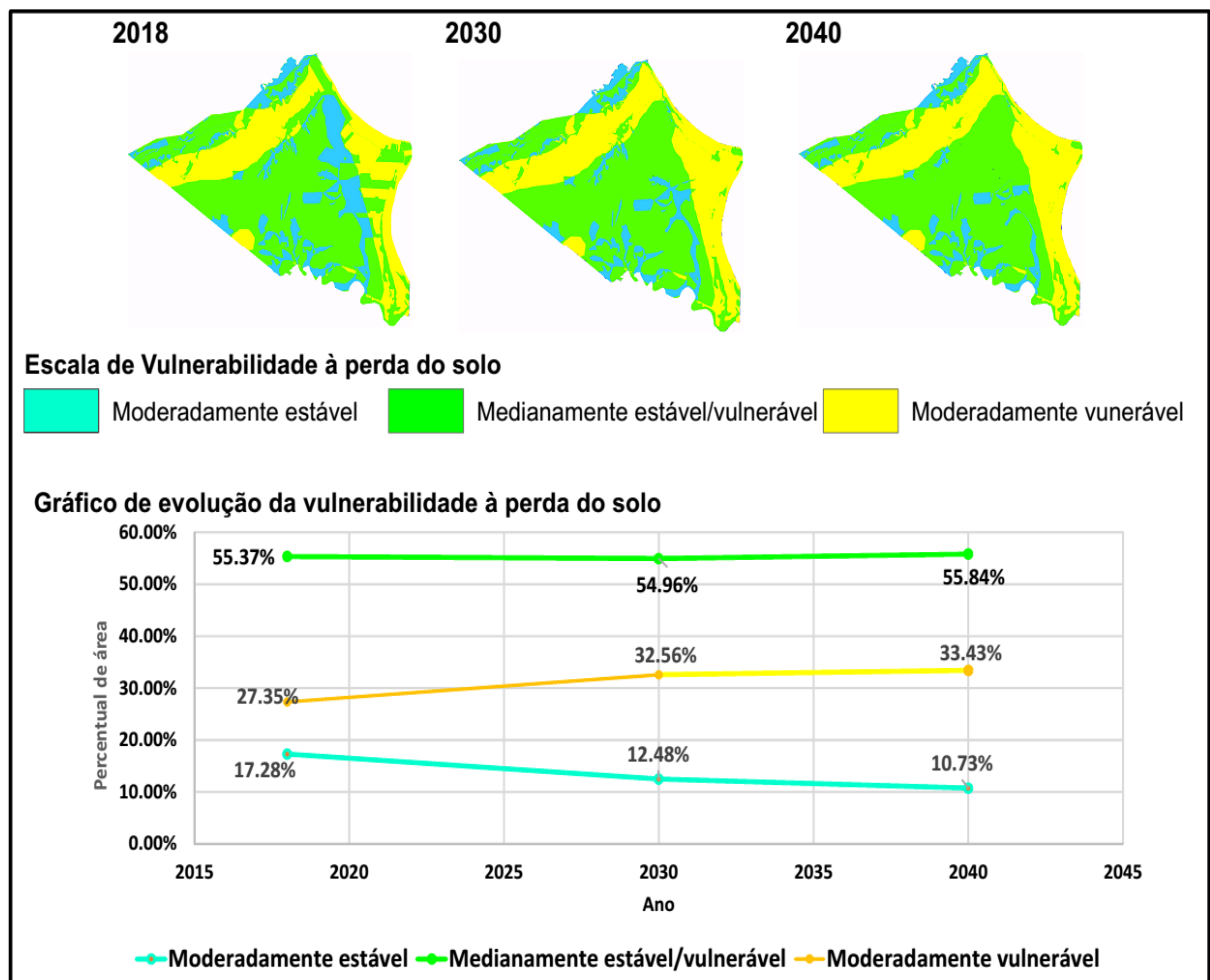


Figura 4. Vulnerabilidade à perda do solo para os anos de 2018, 2030 e 2040.

No estudo não foram observadas áreas enquadradas como estáveis ou vulneráveis, ou seja, áreas onde ocorram o domínio dos processos de pedogênese ou de morfogênese.

Estudos anteriores como os realizados por Dias e Silva (2015) e Carvalho, Ribeiro, Santos e Carvalho (2019) na tentativa de estimar quantitativamente as perdas de solo por erosão laminar definiram que no município de Lucena havia, para o ano de 2014, uma predominância de moderada suscetibilidade à perda do solo. Estes resultados coadunam com os obtidos neste trabalho, onde a vulnerabilidade a perda do solo para os anos estudados varia na escala entre moderadamente estável e moderadamente vulnerável.

Bezerra, I. S. B.; Silva, T. C.

O estudo da dinâmica espaço-temporal da vulnerabilidade à perda do solo para os anos de 2018 a 2040 indicou uma propensão, mesmo que pequena, à intensificação dos processos erosivos (Figura 5), principalmente ao logo da região do Tabuleiros Costeiros e em menor importância na Planície Costeira.

Entre os anos de 2018 e 2030 observou-se a tendência das áreas apresentarem alteração nos níveis de vulnerabilidade. Em 10,68% do município de Lucena-PB espera-se uma melhoria nos níveis de propensão à perda do solo, passando a apresentar uma tendência à estabilidade decorrente da manutenção da cobertura de Mata Atlântica e da substituição de culturas agrícolas, como o caso de cana-de-açúcar por coco-da-baía.

Em sentido oposto, verificou-se que em apenas 0,62% do município há tendência ao aumento da vulnerabilidade.

Analisando o período de 2030 a 2040, observou-se a possibilidade da intensificação dos processos erosivos em 1,87% da área do município. Estas tenderam a se tornar mais susceptíveis, logo mais vulneráveis e estão relacionadas a supressão da vegetação de Mata Atlântica para a implantação de práticas agrícolas e de áreas urbanas.

Destaca-se que no período de 2018 a 2040 há uma tendência à manutenção dos níveis de vulnerabilidade à perda do solo em mais de 90% do território o que é explicado pela lenta dinâmica de mudança no uso e ocupação do solo conforme as

predições realizadas para estas áreas, o que não alterará de maneira significativa os processos erosivos desta região.

Estes resultados indicam a necessidade da implantação de medidas que minimizem os processos erosivos na região. Bera, Mukhopadhyay & Das (2022) e Pandey, Nautiyal, Kumar, Chandra, & Panwar (2022) enfatizam a necessidade de um planejamento adequado do uso e ocupação do solo e gestão das bacias hidrográficas, não só como forma de controle dos processos erosivos, mas principalmente para se evitar a contaminação das águas subterrâneas.

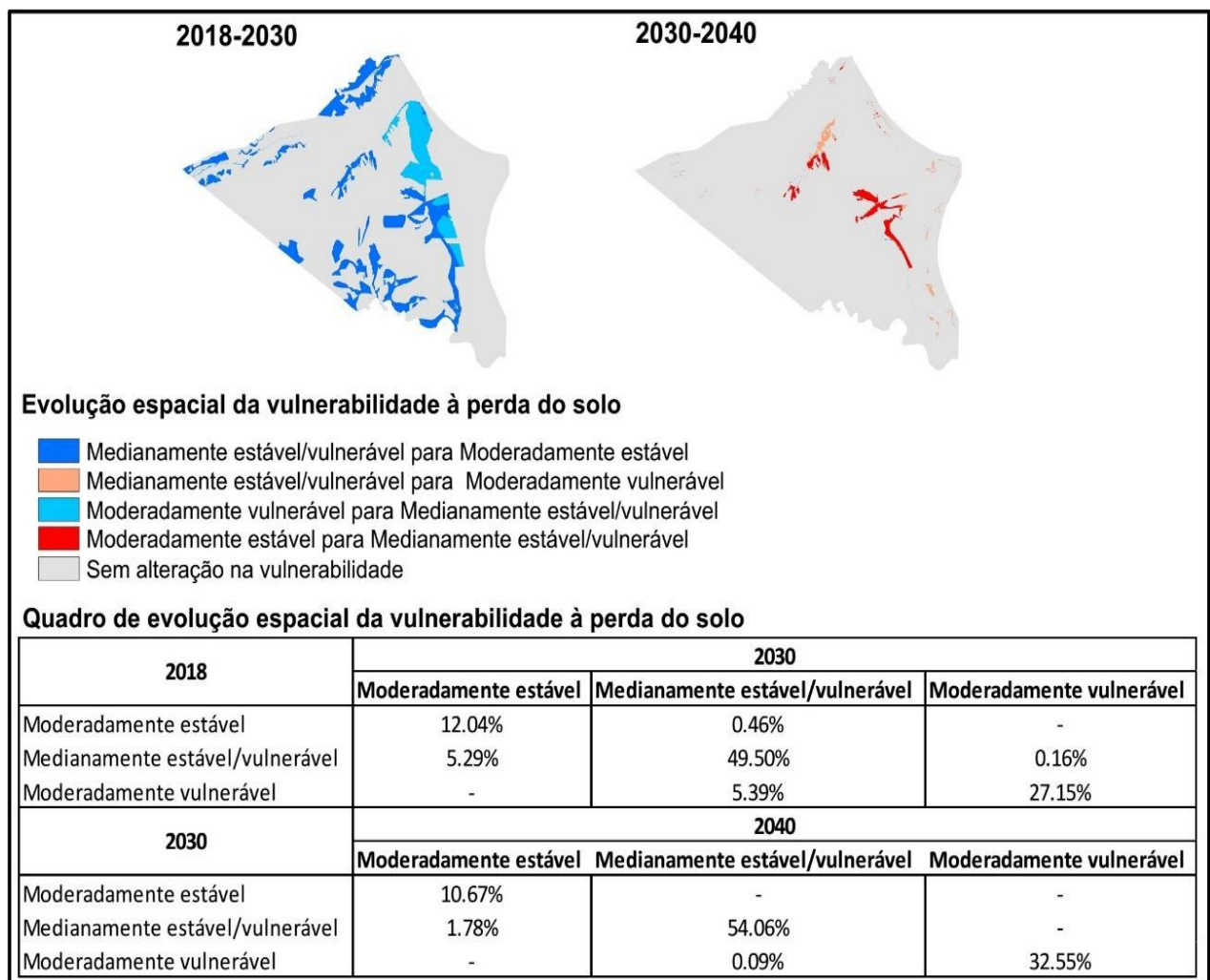


Figura 5. Evolução espaço temporal da vulnerabilidade à perda do solo.

Conclusões

Neste estudo foi realizado a avaliação espacial e quantitativa da vulnerabilidade à perda do solo, considerando a evolução do uso e ocupação do solo para os períodos de 2018, e futuros de 2030 e 2040, o que permitiu concluir que:

A análise da vulnerabilidade à perda do solo no município de Lucena para o período de 2018 a 2040, considerando os temas básicos (tipos de solo, formação geológica e geomorfológica e características climáticas), possibilitou inferir que os temas clima e a geomorfologia tendem a favorecer a predominância do processo de pedogênese, o solo e a geologia indicam um equilíbrio entre esses processos, enquanto o uso e ocupação do solo contribui para a intensificação dos processos erosivos.

O modelo proposto para o estudo da vulnerabilidade à perda no solo no Lucena-PB, pautado no AHP apresentou uma excelente taxa de consistência e indicou, que para esse município, o fator uso e ocupação do solo era a variável com maior influência sobre o resultado.

De maneira geral, a aplicação do modelo indicou equilíbrio entre os processos de pedogênese e morfogênese, com a uma pequena tendência de aumento do nível de vulnerabilidade, variando entre níveis medianos e moderados de vulnerabilidade/estabilidade, sugerindo que até o ano de 2040 não deverá haver mudanças significativas dos níveis de vulnerabilidade em relação às observadas no ano de 2018.

Referências

Bag, R., Mondal, I., Dehbozorgi, M., Bank, S. Pr., Das, D. N., Bandyopadhyay, J. ... Nguyen, X. C. 2022. Modelling and mapping of soil erosion susceptibility using machine learning in a tropical hot sub-humid environment. *Journal Of*

Cleaner Production, 364. 132428-132440. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132428>.

Bera, A., Mukhopadhyay, B. P. & Das, S. 2022. Groundwater vulnerability and contamination risk mapping of semi-arid Totko river basin, India using GIS-based DRASTIC model and AHP techniques. *Chemosphere*, 307. 135831-135842.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135831>.

Bezerra, I.S. & Silva, T.C. 2022, Influência da Evolução do Uso e Ocupação do Solo do Município de Lucena-PB no Armazenamento de Carbono: Projeções para os anos de 2030 e 2040. *Anuário do Instituto de Geociências*, 45. 1-11 https://doi.org/10.11137/1982-3908_4540011.

Birkmann, J., Cardona, O., Carreño, M.L., Barbat, A.H., Pelling, M., Schneiderbauer, S. ... Welle, T. 2013. Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. *Natural Hazards*, 67. 193-211.

<http://dx.doi.org/10.1007/s11069-013-0558-5>.

Brasil. Lei nº 11428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. Brasília, DF: D.O.U, 26 de dezembro de 2006.

Cardona, O.D., Ordaz, M.G., Marulanda, M.C., Carreño, M.L. & Barbat, A.H. 2010. Disaster risk from a macroeconomic perspective: a metric for fiscal vulnerability evaluation. *Disasters*, 4. 1064-1083.

<http://dx.doi.org/10.1111/j.0361-3666.2010.01183.x>.

Carvalho, H.J.M.; Ribeiro, C.A.M.; Santos, M.A. & Carvalho, P.V.R. 2019. Estimativa de perda de solo por erosão laminar em Lucena-PB. *Revista de Geociências do Nordeste*, 5. 57-68.

<http://dx.doi.org/10.21680/2447-3359.2019v5n0id17972>.

Castro, R.M., Alves, W.S., Marcionilio, S.M.L.O., Moura, D.M.B. & Oliveira, D.M.S. 2022. Soil losses related to land use and rainfall seasonality in a watershed in the Brazilian Cerrado. *Journal Of South American Earth Sciences*, 119. 104020-104030.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104020>.

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. MCT/INPE, São José dos Campos.

- Das, B., Bordoloi, R., Thungon, L. T., Paul, A., Pandey, P. K., Mishra, M. ...; Tripathi, O. P. 2020. An integrated approach of GIS, RUSLE and AHP to model soil erosion in West Kameng watershed, Arunachal Pradesh. *Journal Of Earth System Science*, 129, 94-104. <http://dx.doi.org/10.1007/s12040-020-1356-6>.
- Dias, E.R. & SILVA, R.M. 2015. Estimativa do risco à erosão do solo no município de Lucena - Paraíba. *Caminhos de Geografia*, 16. 192-204. <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdeg eografia/article/view/28006>.
- Endalamaw, N. T., Moges, M. A., Kebede, Y. S., Alehegn, B. M. & Sinshaw, B. G. 2021. Potential soil loss estimation for conservation planning, upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Environmental Challenges*, 5. 100224-100233. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envc.2021.100224>
- Endalew, T. & Biru, D. 2022. Soil erosion risk and sediment yield assessment with Revised Universal Soil Loss Equation and GIS: the case of nesha watershed, southwestern ethiopia. *Results In Geophysical Sciences*, 12. 100049-10060. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ringps.2022.100049>
- Ferretti, V. & Montibeller, G. 2017. An Integrated Framework for Environmental Multi-Impact Spatial Risk Analysis. *Risk Analysis*, 39. 257-273. <http://dx.doi.org/10.1111/risa.12942>.
- Furrier, M., Araújo, M.E. & Meneses, L.F. 2006. Geomorfologia e tectônica da Formação Barreiras no Estado da Paraíba. *Geologia USP - Série Científica*, 6. 61-70. <http://dx.doi.org/10.5327/s1519-874x2006000300008>.
- Haidara, I., Tahri, M., Maanan, M. & Hakdaoui, M. 2019. Efficiency of Fuzzy Analytic Hierarchy Process to detect soil erosion vulnerability. *Geoderma*, 354. 113853-113868. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.07.011>.
- Hembram, T.K. & Saha, S. 2018. Prioritization of sub-watersheds for soil erosion based on morphometric attributes using fuzzy AHP and compound factor in Jainti River basin, Jharkhand, Eastern India. *Environment, Development and Sustainability*, v. 22. 1241-1268. <http://dx.doi.org/10.1007/s10668-018-0247-3>.
- Huang, W., Huang, C.H, Peng, Y. & Lu, L. 2016. Qualitative risk assessment of soil erosion for karst landforms in Chahe town, Southwest China: A hazard index approach. *Catena*, 144. 184-193. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.05.008>
- Joshi, P., Adhikari, R., Bhandari, R., Shrestha, B., Shrestha, N., Chhetri, S. ... Routh, J. 2023. Himalayan watersheds in Nepal record high soil erosion rates estimated using the RUSLE model and experimental erosion plots. *Heliyon*, 9. 15800-15815. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15800>.
- Kumar, G., Kurothe, R.S., Viswakarma, A.K., Mandal, D., Sena, D. R., Mandal, U., Dinesh, D. 2023. Assessment of soil vulnerability to erosion in different land surface configurations and management practices under semi-arid monsoon climate. *Soil And Tillage Research*, 230. 105698-106008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2023.105698>.
- Lavell, A. 2012. Climate Change: New Dimensions in Disaster Risk, Exposure, Vulnerability, and Resilience. In: FIELD, Christopher B. et al (Org.). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, New York.
- Lopes, T.R., Nascimento, J.G., Pacheco, A.B., Duarte, S.N., Neale, C.M.U. & Folegatti, M.V. 2022. Estimation of sediment production and soil loss in a water supply basin for the metropolitan region of São Paulo - Brazil. *Journal Of South American Earth Sciences*, 118. 103929-103940. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103929>
- Li, X., Zhou, Y. Tian, B., Kuang, R. & Wang, L. 2015. GIS-based methodology for erosion risk assessment of the muddy coast in the Yangtze Delta. *Ocean & Coastal Management*, 108. 97-108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.14.09.028>.
- 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*, 112. 50-57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2019.02.012>.
- Makhtoumi, Y., Abbasi, A., Seyedmakhtoom, B., Ibeanusi, V. & Chen, G. 2023. Evaluating soil loss under land use management and extreme rainfall. *Journal Of Contaminant Hydrology*, 256. 104181-104191. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104181>.
- Malzac, M.E. 2019. Avaliação da dinâmica espacial e temporal da vulnerabilidade

- ambiental da zona costeira sul do estado da Paraíba. Tese (Doutorado). João Pessoa, UFPB.
- Olika, G., Fikadu, G. & Gedefa, B. 2023. GIS based soil loss assessment using RUSLE model: a case of horo district, western ethiopia. *Heliyon*, 9. 13313-13326. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13313>.
- Ozsahin, E., Duru, U. & Eroglu, I. 2018. Land Use and Land Cover Changes (LULCC), a Key to Understand Soil Erosion Intensities in the Maritsa Basin. *Water*, 10. 335-350. <http://dx.doi.org/10.3390/w10030335>.
- Pandey, S., Kumar, P., Zlatic, M., Nautiyal, R. & Panwar, V.P. 2021. Recent advances in assessment of soil erosion vulnerability in a watershed. *International Soil And Water Conservation Research*, 9. 305-318. <http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.03.001>
- Pandey, S., Nautiyal, R., Kumar, P., Chandra, G. & Panwar, V.P. 2022. A grey relational model for soil erosion vulnerability assessment in subwatershed of lesser Himalayan region. *Catena*, 210. 105928-105938. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2021.105928>
- .PERH. Plano Estadual de Recursos Hídricos. João Pessoa: AESA, 2003. Disponível em: http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2017/07/Plano-Estadual-de-Recursos-H%C3%ADricos-PERH-Relatorio_Final.zip. Acesso em: 05 maio 2019.
- Rahman, Md.R., Shi, Z.H. & Chongfa, D.Z. 2015. Assessing soil erosion hazard -a raster based GIS approach with spatial principal component analysis (SPCA). *Earth Science Informatics*, 8. 853-865. <http://dx.doi.org/10.1007/s12145-015-0219-1>
- Raj, A. D., Kumar, S. & Sooryamol, K.R. 2022. Modelling climate change impact on soil loss and erosion vulnerability in a watershed of Shiwalik Himalayas. *Catena*, 214. 106279-106289. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2022.106279>
- Santos, H.G., Zaroni, M.J., & Clemente, E.P.2018. Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos. EMBRAPA, Brasília.
- Senanayake, S. & Pradhan, B. 2022. Predicting soil erosion susceptibility associated with climate change scenarios in the Central Highlands of Sri Lanka. *Journal of Environmental Management*, 308. 114589-114599. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114589>.
- Ştefan, B., Sanda, R., Loan, F., Luliu, V., Sorin, F. & Danut, P. 2017. Quantitative evaluation of the risk induced by dominant geomorphological processes on different land uses, based on GIS spatial analysis models. *Frontiers of Earth Science*, 12. 311-324. <http://dx.doi.org/10.1007/s11707-017-0679-3>.
- Woldemariam, G., Iguala, A.D., Tekalign, S. & Reddy, R.U. 2018. Spatial Modeling of Soil Erosion Risk and Its Implication for Conservation Planning: the Case of the Gobeles Watershed, East Hararghe Zone, Ethiopia. *Land*, [s.l.], v. 7, n. 1, p.25-50, 21 fev. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/land7010025>.
- Souza Júnior, G. R. 2003. Ruptura de taludes em barragens de contenção de rejeitos devido ao desenvolvimento de subpressões. Dissertação (Mestrado)São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- USGS. U. S. Geological Survey, 2020. Mineral commodity summaries 2020 - 200p, 88-89, Reston, Virginia, USA.
- USGS. U. S. Geological Survey, 2018. Mineral commodity summaries 2018 - 204p, 92-93, Reston, Virginia, USA.
- Xia, C. & Zhai, G. 2023. Territorial spatial vulnerability assessment based on PSO-BP neural network: a case study in shenzhen, china. *Ecological Informatics*, 75. 102088-102100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102088>