

ANÁLISE DE ÁREAS DE VULNERABILIDADE A PROCESSOS EROSIVOS POR MEIO DE LÓGICA FUZZY E ANÁLISE MULTICRITÉRIO, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BOA VIAGEM, CEARÁ, BRASIL

ANALYSIS OF VULNERABILITY AREAS TO SOIL LOSS THROUGH FUZZY LOGIC AND MULTI-CRITERIA ANALYSIS, IN THE BOA VIAGEM RIVER HYDROGRAPHIC BASIN, CEARÁ, BRAZIL

Ulisses Costa de OLIVEIRA, Ana Bárbara de Araújo NUNES

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Campus do Pici UFC, bloco 713 – Pici. Fortaleza – CE. E-mails: ucoliveira@gmail.com; abarbara@deha.ufc.br

- Introdução
- Metodologia
 - Caracterização da área de estudo
 - Obtenção dos dados
 - Ponderação dos critérios e subcritérios
 - Ponderação dos critérios
 - Ponderação dos subcritérios
 - Clima
 - Pedologia
 - Geologia
 - Geomorfologia
 - Uso e cobertura da terra
 - Mapa de Vulnerabilidade a Processos Erosivos
- Resultados e discussão
 - Vulnerabilidade para os critérios
 - Vulnerabilidade a Processos Erosivos
- Conclusões
- Referências

RESUMO - O presente trabalho teve como objetivo utilizar a lógica *Fuzzy* e o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para identificar os diferentes níveis de vulnerabilidade a processos erosivos na bacia hidrográfica do Rio Boa Viagem, Ceará, Brasil. Para isto, foi construído um banco de dados geográficos com auxílio do *software* QGIS versão 3.16-Hanover, a partir dos critérios Geologia (G), Geomorfologia (R), Pedologia (S), Uso e Cobertura (U) e Clima (C). Foram identificadas na bacia quatro classes de vulnerabilidade a processos erosivos, que variaram de 1,4 a 2,6, com valor médio na ordem de 1,9. Os resultados mostraram que as classes com predominância de processos pedogenéticos somaram 39,03% da área da bacia. Aquela cujos processos representam equilíbrio entre a pedogênese e a morfogênese representaram 58,40%. A classe onde prevalecem processos morfogenéticos totalizaram 2,57% da área estudada. Através do uso da lógica *fuzzy* e análise multicritério foi possível realizar uma ponderação contínua em conformidade com o comportamento das variáveis ambientais, permitindo representar de maneira eficaz a realidade.

Palavras-chave: Geotecnologias. Ponderação de fatores. Análise ambiental. Análise multivariada. Bacia Hidrográfica.

ABSTRACT - The present work aimed to use Fuzzy logic and the Analytic Hierarchy Process (AHP) method to identify different levels of vulnerability to erosive processes in the Boa Viagem River basin, Ceará, Brazil. For this, a geographic database was built using the QGIS software, version 3.16-Hanover, based on the criteria Lithology, Geomorphology, Soil, Land use and cover and Climate. Four classes of vulnerability to erosive processes were identified in the basin, which ranged from 1.4 to 2.6, with an average value of 1.9. The results showed that classes with predominance of pedogenetic processes added up to 39.03% of the basin area. The class whose processes represent balance between pedogenesis and morphogenesis represented 58.40%. The class where morphogenetic processes prevail totaled 2.57% of the studied area. Through the use of fuzzy logic and multi-criteria analysis, it was possible to carry out a continuous weighting in accordance with the behavior of environmental variables, allowing an effective representation of reality.

Keywords: Geotechnologies. Weighting of factors. Environmental analysis. Multivariate analysis. River Basin.

INTRODUÇÃO

Os estudos geomorfológicos da fragilidade natural e ambiental configuram-se importantes instrumentos de gestão que permitem o zoneamento, monitoramento e tomada de decisão (Waldburger, 2014). Tais estudos em planejamento ambiental, em geral, propõem a análise integrada do meio ambiente, a fim de buscar respostas sobre seus elementos, de modo a considerar o relevo, clima, formas de uso, tipo de vegetação, pluviosidade, pedologia e geologia (Ross, 1994;

Guerrero et al., 2018).

O mapeamento da fragilidade natural e ambiental configura-se um instrumento importante no planejamento de ações sobre o meio ambiente, identificando os pontos de fragilidade e fornecendo assim respostas para a elaboração de planos de manejo, tanto em áreas naturais, quanto em unidades de conservação (Trevisan et al., 2018a,b).

De acordo com Tricart (1977), o ambiente se mantém em equilíbrio dinâmico com relações

naturais de troca. O autor sugeriu um modelo de avaliação dos graus de instabilidade usando informações sobre pedogênese e morfogênese. O modelo proposto foi adaptado por Ross (1994) a partir de informações sobre intervenção humana, geomorfologia, solos, cobertura vegetal e clima, estabelecendo importâncias diferentes para cada variável. Crepani et al. (2001) utilizou as variáveis índice de dissecação do relevo, rocha, solo e cobertura vegetal e estabeleceu igual importância para as variáveis ambientais no estudo de fragilidade. Destaca-se que os resultados sobre fragilidade são distintos ao comparar esses modelos, conforme mostrado por Spörl & Ross (2004).

A metodologia para análise de fragilidade ambiental está diretamente relacionada à escolha dos fatores de ponderação, bem como ao contexto em que é realizada (Dalla Corte et al., 2015; Oliveira & Moreau, 2021; Lira et al., 2021; Silva et al., 2021). O estudo da fragilidade ambiental constitui uma das principais ferramentas utilizadas pelos órgãos públicos na elaboração do planejamento territorial e ambiental, permitindo que o mapeamento considere a dinâmica do meio ambiente, combinando as características ambientais com suas restrições (Carmo et al., 2011).

A análise da fragilidade ambiental envolve diversos procedimentos obrigatórios, tais como levantamentos de campo e serviços de laboratório, permitindo a geração de produtos cartográficos temáticos de Uso e Cobertura do da Terra, Geomorfologia, Geologia, Pedologia, Climatologia e Vegetação, utilizados em conjunto para mapeamento da vulnerabilidade à erosão. Primeiramente, procede-se a avaliação do grau de vulnerabilidade para cada tema, atribuindo-lhes valores que variam de acordo com o seu estado ecodinâmico, sendo que para as áreas consideradas ecodinamicamente estáveis são associados valores próximos a 1 (um); para áreas intermediárias valores próximos a 2 (dois) e, em áreas instáveis, valores próximos a 3 (três) (Crepani et al., 2001).

Diversos pesquisadores aplicaram esta metodologia na determinação da vulnerabilidade natural à erosão em diferentes recortes espaciais. No caso de bacias hidrográficas, objeto de estudo do presente trabalho, diversos trabalhos podem ser citados, tais como Rosa & Ferreira (2021), Carvalho et al. (2020), Silva et al. (2020), Demarchi et al. (2019), Teruya Junior et al. (2018), Nascimento Machado et al. (2017).

Rosa & Ferreira (2021) mapearam a vulnerabilidade natural à perda de solos na unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos efluentes do baixo curso da bacia hidrográfica do Rio Paranaíba, no estado de Minas Gerais. Foram utilizados dados de geologia, declividade, pedologia, intensidade pluviométrica e cobertura e uso da terra. Como resultado, foi observado que a área estudada apresenta homogeneidade em relação aos componentes físico-geográficos utilizados no procedimento, indicando que a área necessita de diretrizes de manejo e conservação dos solos. Além disso, sugeriu-se diretrizes que podem ser desenvolvidas em uma proposta de zoneamento ambiental.

Carvalho et al. (2020) desenvolveram o trabalho de classificação da fragilidade ambiental frente ao uso do solo no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Camaquã, no Rio Grande do Sul. Neste trabalho os autores identificaram variáveis de ambiente, denominadas variáveis de ambiente Físico, Biótico e Antrópico, tendo sido utilizados dados de declividade e resistência do solo (físico), vegetação (biótico) e uso e cobertura da terra (antrópico). Na metodologia foram atribuídos diferentes pesos (notas) para as diferentes variáveis vinculadas aos cenários: físico, antrópico e biótico. Os resultados do trabalho mostraram que a declividade foi a principal variável na definição da fragilidade ambiental na área estudada.

Silva et al. (2020) procederam um mapeamento da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio Candeias, Rondônia, a partir da associação entre atributos naturais (declividade, pedológica e erosividade) e ação antrópica (uso e ocupação do solo). Os resultados indicaram que mais de 60% da área da bacia possui fragilidade ambiental considerada média, tanto potencial quanto emergente. A comparação entre a fragilidade potencial e emergente possibilitou observar a importância do uso do solo de forma adequada, uma vez que a adoção de práticas agrícolas adequadas contribuiu para a redução da fragilidade potencial na área.

Demarchi et al. (2019) estudaram a vulnerabilidade natural à erosão da sub-bacia do Ribeirão das Perobas, município de Santa Cruz do Rio Pardo – SP, a partir da média aritmética entre os mapas dos fatores Geologia, Relevo, Solos, Vegetação/uso da terra e Clima. Os resultados mostraram que os meios moderadamente estáveis representaram 10,35 % da área da sub-bacia; os meios medianamente estáveis/vulneráveis ocuparam

85,04 % e os meios moderadamente vulneráveis, 4,61 % de sua área total, denotando o predomínio do equilíbrio entre os processos morfogenéticos e pedogenéticos e a vulnerabilidade média dos solos aos processos erosivos.

Teruya Junior et al. (2018) mapearam a vulnerabilidade natural e ambiental da Bacia Hidrográfica Rio Formoso, Mato Grosso do Sul dos anos de 1989 e 2005. Os autores abordaram a vulnerabilidade natural através do cruzamento dos mapas base de geologia, geomorfologia, associação de solos e uso e ocupação do solo. Como resultados, foram obtidos produtos relacionados à vulnerabilidade natural e vulnerabilidade ambiental.

Nascimento Machado et al. (2017) promoveram o mapeamento da vulnerabilidade à perda de solo na microbacia Lajeado Pessegueiro, Guarujá do Sul, Santa Catarina. O mapeamento de vulnerabilidade foi desenvolvido por meio de análise ambiental integrada com as variáveis fisiografia, pedológico, uso e ocupação das terras e declividade. Os resultados obtidos indicaram a predominância com 51,98% de áreas medianamente

estável/vulnerável na microbacia e essa ocorrência está associada principalmente à presença de um equilíbrio entre os processos de morfogênese e pedogênese. O resultado obtido pode ser utilizado na elaboração de medidas de prevenção e aplicação de práticas e manejo do solo que visam a diminuição da perda do solo.

Observa-se, a partir da análise dos trabalhos produzidos, que em todos os casos obteve-se êxito na aplicação, possibilitando a geração de mapas de vulnerabilidade à erosão e vulnerabilidade ambiental, servindo como fonte de informações para subsidiar planejamento ambiental não somente em bacias hidrográficas, mas em diversos recortes espaciais.

Diante do exposto, o presente trabalho visou apresentar a vulnerabilidade a processos erosivos na bacia hidrográfica do Rio Boa Viagem, localizado no estado do Ceará, fornecendo uma contribuição para trabalhos de zoneamento, planejamento e gestão ambiental por meio da adaptação da metodologia de Crepani et al. (2001) utilizando-se conceitos e técnicas de análise multicritério e lógica *fuzzy*.

METODOLOGIA

A presente pesquisa desenvolveu-se a partir de três etapas metodológicas. A primeira etapa consistiu na pesquisa da literatura acerca da caracterização da área de estudo, bem como sobre metodologias e técnicas utilizadas no mapeamento da vulnerabilidade à perda de solos. A segunda etapa envolveu a coleta e confecção de dados para construção da base de dados espaciais e tratamento das bases já existentes, bem como a elaboração dos mapas temáticos. A terceira e última etapa visou a construção dos mapas de vulnerabilidade a processos erosivos por meio da aplicação da análise multicritério e lógica *fuzzy*, como também posterior análise dos resultados.

Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do Rio Boa Viagem (BHRBV) localizada no estado do Ceará (Figura 1). A BHRBV localiza-se entre as coordenadas geográficas 4°43'S e 5°25'S e 40°17'O e 39°33'O, com área de 2.653 km². O Rio Boa Viagem é o mais importante rio desta bacia, composto a montante da cidade de Boa Viagem pelos riachos Barreiros e da Ramadinha, desenvolvendo-se no sentido oeste-leste, percorrendo um curso total de 84 km, até desaguar no Rio Quixeramobim. Sua área equivale a 2% do território cearense.

A BHRBV encontra-se sobre superfície de aplainamento conservada ou moderadamente dissecada em colinas rasas ou em pequenos interflúvios tabulares, sendo os vales abertos e sendo mínima a amplitude altimétrica entre os fundos de vales e os interflúvios sertanejos com feições tabulares ou em forma de colinas. Sua altitude varia geralmente entre níveis de 246 m a 1100 m. As maiores altitudes, a oeste, determinam o sentido oeste-leste da maior parte dos cursos d'água secundários que convergem para o rio principal, assim como este último mantém a direção leste até convergir-se com o Rio Quixeramobim, como já citado, formando-se aluviões em seu trecho final. O clima é do tipo Tropical Quente Semiárido com temperaturas médias anuais em torno dos 26°C a 28°C. A média pluviométrica anual aproxima-se dos 725,4 mm.

A bacia apresenta um padrão geológico simples, observando-se um predomínio de rochas do embasamento cristalino, representadas por gnaisses e migmatitos diversos, associados a rochas plutônicas e metaplutônicas de composição predominantemente granítica. Sobre esse substrato, repousam coberturas neógenas, que afloram sob a forma de manchas esparsas, ao longo da região, e coberturas aluviais, de idade quaternária, encon-

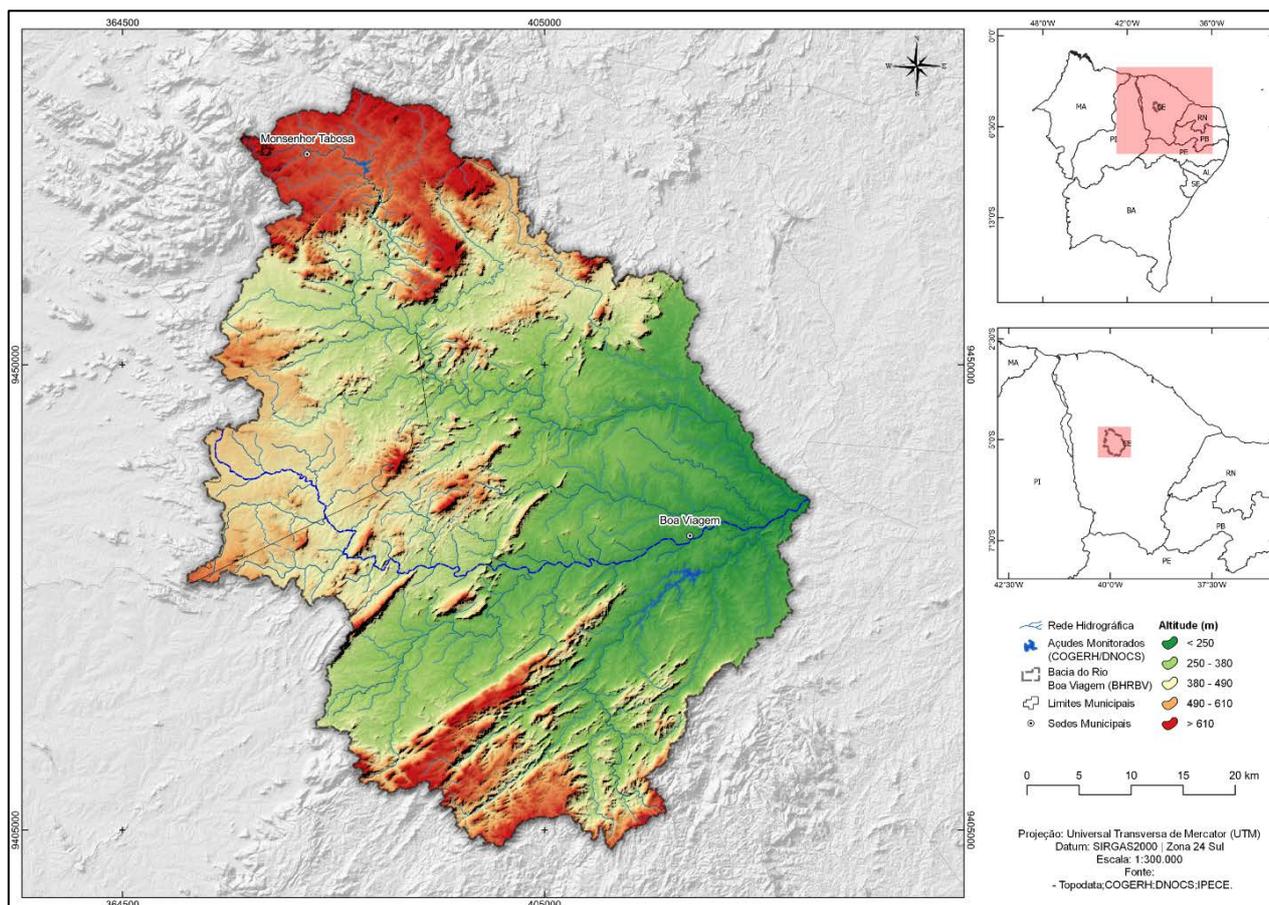


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Boa Viagem, Ceará, Brasil.

tradas ao longo dos cursos d'água. As litologias do embasamento cristalino são recobertas por solos rasos onde há maior ocorrência de solos Neossolos Litólicos, Planossolos e Vertissolos nos sedimentos cenozoicos do período Quaternário (recentes) e nos Aluviões dos rios, solos Neossolos Flúvicos, com grande potencial agrícola, e rochas do embasamento cristalino pré-cambriano no restante da área, onde predominam Luvisolos, solos medianamente profundos e moderadamente ácidos, porém pedregosos e susceptíveis à erosão, e Planossolos Háplicos, solos rasos, susceptíveis à erosão, com limitada fertilidade natural, além de manchas de Argissolos Eutróficos e Chernossolos, solos medianamente profundos e com grande potencial agrícola (Ceará, 2009).

Os terrenos da BHRBV são revestidos, predominantemente, por caatinga degradada, onde há certa frequência de cactáceas. Os tipos predominantes de vegetação são a Caatinga Arbustiva Aberta, no centro da bacia, e Caatinga Arbustiva Densa na maior parte das áreas leste e oeste da bacia (Fuck Júnior, 2008).

Obtenção dos dados

Para realização do presente trabalho, foram utilizados dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial reamos-

trada a 30 metros, a partir da grade vetorial do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil Topodata do INPE, através de imagens do tipo Modelo Digital de Elevação (MDE), articuladas na escala de 1:250.000. Os limites da bacia hidrográfica foram obtidos da Base Hidrográfica Otocodificada, no sítio eletrônico da Agência Nacional de Águas – ANA (ANA, 2015).

Quanto aos dados de uso e cobertura da terra, utilizou-se a Plataforma do Projeto Mapbiomas que tem como objetivo o mapeamento anual da superfície do solo a nível nacional, dispondo de arquivos no formato *raster* com resolução espacial de 30 metros, cujos valores de pixels compreendem classes de cobertura e uso para o ano de 2020 (MAPBIOMAS, 2020).

Os dados vetoriais de pedologia e geologia foram adquiridos através do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019) na escala de 1:250.000.

Os dados de precipitação foram adquiridos do Projeto de Previsão de Recursos Energéticos Mundiais (POWER) da Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA) *Langley Research Center* (LaRC), financiado pelo Programa de Ciências da Terra/Ciências Aplicadas da NASA.

Os dados adquiridos foram padronizados por

meio de projeção para SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geodésico para as Américas 2000), UTM zona 24 Sul. Todos os arquivos foram convertidos para o formato *raster*, com resolução espacial de 30 metros, dimensões de linhas e colunas com 1993 e 2455, respectivamente, adotando-se uma borda de 2 km para evitar efeitos de borda. De acordo com Francisco et al. (2019), os referidos procedimentos permitem simplificar cálculos métricos e uniformizar parâmetros para realização da análise multicritério.

Ponderação dos critérios e subcritérios

Com vistas a se realizar o mapeamento da vulnerabilidade a processos erosivos por meio de cruzamento de mapas temáticos, utilizou-se uma abordagem metodológica matemática híbrida, integrando a metodologia proposta por Crepani et al. (2001), desenvolvida com base no conceito de ecodinâmica de Tricart (1977), com o método *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* – FAHP proposto por Chang (1996). A figura 2 elenca detalhadamente as fases da modelagem aplicada.

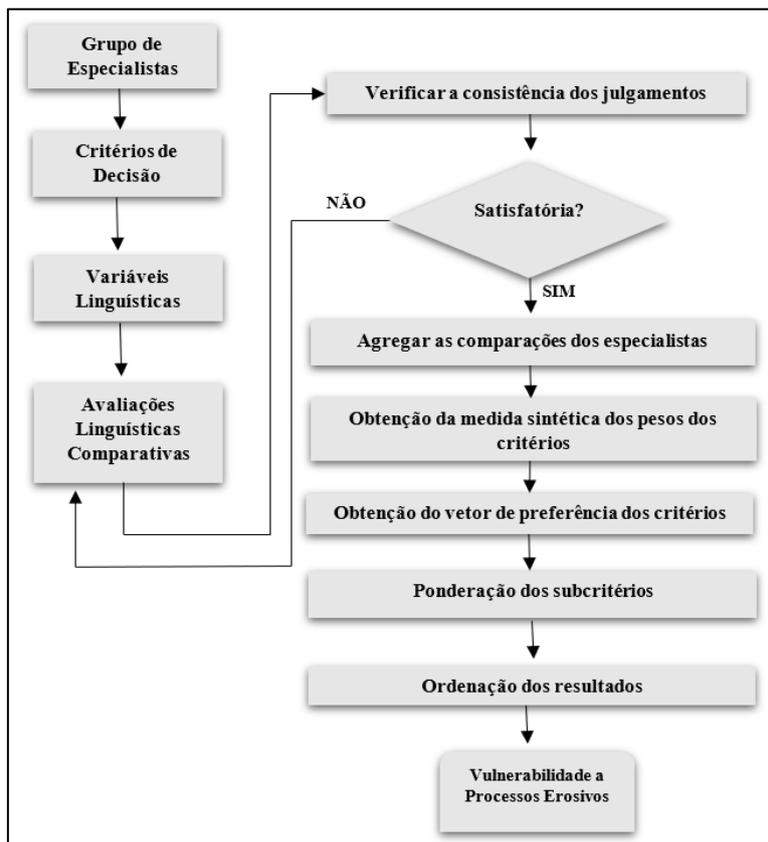


Figura 2 – Método *Fuzzy-AHP* para estruturação da vulnerabilidade a processos erosivos.

A vulnerabilidade das unidades de paisagem foi estabelecida através de uma escala de valores (21 classes de 1,0 a 3,0) conforme Crepani et al. (2001), de acordo com a relação morfogênese/pedogênese, analisando-se cada um dos critérios. Posteriormente, fez-se uma classificação do grau de estabilidade ou vulnerabilidade de cada unidade ambiental, segundo as relações entre os processos de morfogênese e pedogênese, sendo possível elaborar a carta de vulnerabilidade a processos erosivos.

Os critérios elencados no presente trabalho foram aqueles definidos por Crepani et al. (2001), a saber: Geologia (G), Geomorfologia (R), Pedologia (S), Uso e Cobertura (U) e Clima (C). Foram consideradas subcritérios as classes integrantes de cada critério, como por exemplo, as classes de solo. A vulnerabilidade das unidades de paisagem foi

estabelecida através de uma escala de valores (1,0 a 3,0) conforme Crepani et al. (2001), de acordo com a relação morfogênese/pedogênese, analisando-se cada um dos subcritérios. O método FAHP foi aplicado para calcular os pesos relativos dos critérios definidos que contribuem para a modelagem da vulnerabilidade a processos erosivos.

Ponderação dos critérios

O método *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (FAHP) é uma técnica estruturada para organizar e analisar problemas de tomada de decisão multicritério (MCDM), onde decisões complexas precisam ser tomadas em um contexto em que existem múltiplos objetivos e múltiplos critérios que têm impacto sobre as decisões. Ao aplicar esta técnica, variáveis linguísticas *fuzzy* e números triangulares *fuzzy* associados podem ser usados para fazer

comparações entre os atributos influentes e, portanto, fornecer soluções para problemas vagos e incertos na tomada de decisão (Zadeh, 1965; Sun, 2010; Kannan et al., 2014; Alyamani & Long, 2020; Alyamani et al., 2021).

A vantagem do método FAHP reside na possibilidade de modelar esse tipo de incerteza por meio da incorporação dos conjuntos *fuzzy* na matriz de comparação pareada, funcionando como uma extensão do processo de análise hierárquica (Stefano et al., 2017).

De acordo com Rosendo (2019) a classificação convencional através da atribuição de valores fixos para uma área pode contribuir na propagação de erros na modelagem da paisagem. A lógica *fuzzy* aliada à análise multicritério e às geotecnologias tem desempenhado um papel importante em estudos ambientais, pois permite representar a variação e a importância relativa de cada característica ambiental no fenômeno estudado.

As etapas adotadas são descritas a seguir.

Etapa 1: A primeira etapa do processo de ranqueamento dos critérios selecionados envolve tanto ferramentas computacionais como a participação de especialistas ou grupo de especialistas, cujo papel abrange:

Definição e estruturação do problema de decisão: para isto, deve-se estruturar uma hierarquia na qual são identificados o objetivo da decisão, os critérios e as alternativas. Tomando-se como base a abordagem teórica de Saaty & Vargas (1982), assume-se que n critérios devem ser considerados antes de se tomar uma decisão. No desenvolvimento da hierarquia a ser aplicada no método FAHP, devem ser considerados três níveis de análise: o objetivo, os critérios e as alternativas.

O problema é estruturado de acordo com uma hierarquia onde o elemento superior é o objetivo da decisão, no caso deste trabalho a vulnerabilidade a processos erosivos. O segundo nível da hierarquia representa os critérios e o nível mais baixo representa os subcritérios.

Definição de um conjunto de termos linguísticos para avaliação dos critérios utilizados: a escala triangular *fuzzy* de preferência utilizada neste estudo é apresentada na tabela 1. A definição dos termos linguísticos e seus respectivos números *fuzzy* triangulares (NFTs) visam comparar os critérios com vistas a quantificar seu desempenho. A partir dos termos linguísticos adotados os especialistas avaliam os critérios selecionados.

Tabela 1 – Variáveis linguísticas para comparação pareada de cada critério (Adaptado de Ganguly & Guin, 2013).

Escala Linguística de Importância	Números Fuzzy para FAHP	Escala Fuzzy Triangular	Escala Fuzzy Triangular Recíproca
Igualmente Vulnerável (IV)	$\tilde{1}$	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)
Levemente Mais Vulnerável (LMV)	$\tilde{1,5}$	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)
Mais Vulnerável (MV)	$\tilde{2}$	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
Muito Mais Vulnerável (MMV)	$\tilde{2,5}$	(2, 5/2, 3)	(1/3, 2/5, 1/2)
Extremamente Mais Vulnerável (EMV)	$\tilde{3}$	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)

Agregação das preferências dos k especialistas através das equações 1 a 3, conforme (Büyükköçkan & Feyzioğlu, 2004; Chang et al., 2009):

$$l_{ijk} = \min(l_{ijk}) \quad (1)$$

$$m_{ijk} = \sqrt[k]{\prod_{k=1}^K m_{ijk}} \quad (2)$$

$$u_{ijk} = \max(u_{ijk}) \quad (3)$$

Onde, l_{ijk} , m_{ijk} e u_{ijk} representam os valores inferior, modal e superior, respectivamente, referentes ao especialista k , com número de critérios igual a K . Além disso,

$$l_{ijk} \leq m_{ijk} \leq u_{ijk} \text{ e } l_{ij}, m_{ij}, u_{ij} \in [1/2, 7/2].$$

Verificação de consistência: a verificação de consistência dos valores de julgamentos coletados é conduzida nos mesmos termos adotados no método AHP tradicional, segundo o qual julgamentos consistentes devem satisfazer à condição $CR < 0,1$, sendo calculado por meio da equação 4 (Saaty, 1980; Kara, 2019).

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{RI(n - 1)} \quad (4)$$

Onde, IC = Índice de Consistência; $n = n^\circ$ de critérios da matriz $< \lambda_{m\acute{a}x}$ ou autovalor principal da matriz de julgamentos; RI = índice randômico baseado no tamanho da matriz n , conforme tabela 2. De acordo com Tesfamariam & Sadiq (2006) o CR pode ser avaliado pelo valor modal m .

Tabela 2 – Índice média de consistência randômica (RI) (Saaty & Vargas, 2012).

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de Consistência Randômica (RI)	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Etapa 2: Esta etapa relaciona-se ao cálculo dos pesos por meio da importância relativa *fuzzy* ou extensão sintética *fuzzy* dos critérios. Para isto, utilizou-se a abordagem do método de análise de extensão proposta por Chang (1996), conforme mostrado nas equações 6 a 9, a partir da qual calcula-se a extensão sintética (S_i) que é o número *fuzzy* que representa a importância relativa de cada critério, conforme procedimentos a seguir:

Seja $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ um conjunto de critério e $G = \{g_1, g_2, g_3, \dots, g_n\}$ um conjunto de metas, cada critério terá sua extensão sintética calculada em relação a cada meta (g_i) obtendo-se m valores para cada critério em relação à meta, representados pela equação 21, sendo todos os $M_{g_i}^m$ ($j = 1, 2, \dots, m$) Números *Fuzzy* Triangulares (NFT):

$$M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

Sejam $M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m$ ($i = 1, 2, \dots, n$), medidas sintéticas do i -ésimo critério em relação a m metas, então o valor de extensão sintética *fuzzy* (S_i) para o i -ésimo critério será calculado conforme equação 6:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{j=1}^n l_j, \sum_{j=1}^n m_j, \sum_{j=1}^n u_j \right) \quad (8)$$

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^n u_j}, \frac{1}{\sum_{j=1}^n m_j}, \frac{1}{\sum_{j=1}^n l_j} \right) \quad (9)$$

Etapa 3: Esta etapa engloba o processo de defuzzificação, que consiste na obtenção de um único número da saída do conjunto *fuzzy* agregado pelo grau de valores de pertinência. A defuzzificação é uma transformação inversa em relação ao processo de fuzzificação, pois neste processo, a saída *fuzzy* é convertida em valores inteiros para serem aplicados ao sistema. No presente trabalho foi utilizado o índice centroide

de Yager (1980), um centro geométrico $x_0(A_i)$ do número *fuzzy* da alternativa A_i , onde o centro geométrico corresponde a um valor x no eixo horizontal X (universo do discurso). Para um determinado TFN (l, m, u), o índice de centroide é mostrado na equação 10:

$$x_0(A_i) = \frac{\int_0^1 A_i \mu_{A_i}(x) dx}{\int_0^1 \mu_{A_i}(x) dx} \quad (10)$$

Onde A_i é tratado como uma função peso medindo a importância do valor x . O denominador funciona como um fator de normalização, cujo valor é igual à área sob a função de pertinência μ_{A_i} para uma alternativa A_i . O valor de $x_0(A_i)$ pode ser visto como o valor médio ponderado do número *fuzzy* A_i . Assim, quanto maiores forem os valores de $x_0(A_i)$, melhor será a classificação de uma alternativa.

Após a defuzzificação dos NFTs, os números inteiros são reunidos e normalizados, de acordo com a equação 11, para denotar o peso de importância normalizado do j -ésimo critério.

$$R_j = \frac{W_j}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad (11)$$

Onde $\sum_{j=1}^n R_j = 1$.

Etapa 4: Esta etapa consiste no cálculo dos pesos globais (w_{ij}), calculados multiplicando-se o peso dos subcritérios com o peso dos critérios a que pertencem, conforme equação 12.

$$W_{ij} = c_i X c_{ij} \quad (12)$$

Onde, c_i é o peso do critério i e c_{ij} é o peso do subcritério j dentro do critério i .

Os critérios elencados no presente trabalho foram adaptados daqueles definidos por Crepani et al (2001), a saber: Geologia (G), Geomorfologia (R), Clima (C), Uso e Cobertura (U) e Pedologia (S). Foram consideradas subcritérios as classes integrantes de cada critério, como por exemplo, as classes de solo. O modelo de cálculo da vulnerabilidade a processos erosivo dá-se conforme a equação 13.

$$V = G * w_{ij} + R * w_{ij} + C * w_{ij} + U * w_{ij} + S * w_{ij} \quad (13)$$

Ponderação dos subcritérios

Clima

O estudo climático ocorreu mediante o cálculo da intensidade pluviométrica e se iniciou com a obtenção dos dados de precipitação, cujos valores adquiridos foram então atribuídos aos arquivos

vetoriais de ponto das estações pluviométricas da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – Funceme, totalizando 14 estações, listadas na tabela 3, contendo o nome da estação, localização, altitude e período de anos de observação, compreendendo um período total de 30 anos.

Tabela 3 – Estações pluviométricas, localização, altitude e período de anos de observação.

Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período
Solonópole	-5.7336	-39.0069	155	1990 – 2020
Tauá	-6.0064	-40.2997	401	
Irapuã	-5.1467	-40.4127	335	
Madalena	-4.85	-39.5666	315	
Capim Grosso	-4.8731	-38.2317	49	
Mineirrolândia	-5.5670	-39.6333	299	
Lagoinha	-5.0821	-37.9125	136	
Pedra Branca	-5.1494	-38.8899	147	
Poço Grande	-6.4670	-39.6833	311	
Furnas	-4.5517	-38.6720	122	
Paraíso	-4.5112	-40.1702	235	
Logradouro	-5.4062	-38.1851	98	
Guassusse	-6.3357	-38.9801	214	
Jurema	-4.1685	-39.4572	148	

Após realizar a quantificação da intensidade pluviométrica a partir da divisão da precipitação anual pelo número de meses do período chuvoso na região (fevereiro a maio), foi possível definir duas classes de pesos distintos conforme mostrado na tabela 4.

Tabela 4 – Vulnerabilidade para o critério Clima (Adaptado de Crepani et al., 2001).

Int. Pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade
175 - 200	1,6
200 - 225	1,7
225 - 250	1,8

Pedologia

Na análise da vulnerabilidade do solo, o seu grau de maturidade é considerado o produto direto entre o balanço morfogênese/pedogênese, indicando claramente se prevalecem os processos erosivos da morfogênese, que geram solos jovens, pouco desenvolvidos, ou se, no outro extremo, as condições de estabilidade permitem o predomínio dos processos de pedogênese, gerando solos maduros, profundos, lixiviados e bem desenvolvidos (Florenzano, 2008).

Tomando como referência o mapa pedológico fornecido pelo IBGE (2019), na escala 1:250.000, foram mapeadas as classes de solos, bem como atribuídos seus respectivos valores de vulnerabilidade, conforme tabela 5:

Tabela 5 – Vulnerabilidade para o critério Pedologia (Adaptado de Crepani et al., 2001).

Classes de solo	Vulnerabilidade
Argissolo, Luvisolo Chernossolo, Planossolo	2,0
Neossolo, Vertissolo Afloramento Rochoso	3,0

Geologia

De acordo com Crepani et al. (2001), as rochas que apresentam maior grau de coesão terão atribuídos valores próximos à estabilidade (1,0). No caso das rochas que apresentam valores intermediários no seu grau de coesão, devem ser atribuídos valores intermediários (2,0) e, por fim, às rochas com os menores valores nos graus de coesão, atribuem-se valores próximos à vulnerabilidade (3,0).

Para a área estudada, com base no mapa geológico preexistente fornecido pelo IBGE (2019), na escala 1:250.000, foram mapeados os tipos de rochas, bem como atribuídos seus respectivos valores de vulnerabilidade/estabilidade, conforme tabela 6:

Tabela 6 – Vulnerabilidade para o critério Geologia (Adaptado de Crepani et al., 2001).

Rochas	Vulnerabilidade
Riólito, Granito, Dacito	1,1
Migmatitos, Gnaisses	1,3
Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos	2,9

Geomorfologia

Para o tema Geomorfologia adotou-se os procedimentos para determinação da dissecação do relevo conforme matriz proposta por Ross (1994) adaptado por Guimarães (2017), para geração da amplitude do interflúvio (G) e amplitude altimétrica (A). Crepani et al. (2001) propõe para o tema Geomorfologia a média entre o Índice de Dissecação do Relevo e a Declividade (D), conforme equação 14:

$$R = \frac{G + A + D}{3} \quad (14)$$

Onde R = Vulnerabilidade para o tema Geo-

Tabela 8 – Valores de vulnerabilidade para a amplitude altimétrica (Adaptado de Silva et al.).

Ampl. Altim. (m)	VulN	Ampl. Altim. (m)	Vuln	Ampl. Altim. (m)	Vuln
<20	1,0	77 - 84,5	1,7	141,5 - 151	2,4
20 - 29,5	1,1	84,5 - 94	1,8	151 - 160,5	2,5
29,5 - 39	1,2	94 - 103,5	1,9	160,5 - 170	2,6
39 - 48,5	1,3	103,5 - 113	2,0	170 - 179,5	2,7
48,5 - 58	1,4	113 - 122,5	2,1	179,5 - 189	2,8
58 - 67,5	1,5	122,5 - 132	2,2	189 - 200	2,9
67,5 - 77	1,6	132 - 141,5	2,3	> 200	3,0

Tabela 9 – Valores de vulnerabilidade para a declividade das encostas (Adaptado de Crepani et al., 2001).

Declividade	Vuln	Declividade	Vuln	Declividade	Vuln
<3,5	1,0	17,4 - 19,8	1,7	34,6 - 37,2	2,4
3,5 - 5,8	1,1	19,8 - 22,2	1,8	37,2 - 39,8	2,5
5,8 - 8,2	1,2	22,2 - 24,5	1,9	39,8 - 42,4	2,6
8,2 - 10,3	1,3	24,5 - 27,2	2,0	42,4 - 45,3	2,7
10,3 - 12,9	1,4	27,2 - 29,6	2,1	45,3 - 48,1	2,8
12,9 - 15,1	1,5	29,6 - 32,1	2,2	48,1 - 50	2,9
15,1 - 17,4	1,6	32,1 - 34,6	2,3	>50	3,0

Uso e cobertura da terra

Para geração do tema uso e cobertura da terra foram definidos os pesos para cada classe

morfologia; G = Vulnerabilidade atribuída ao Grau de Dissecação; A = Vulnerabilidade atribuída à Amplitude Altimétrica; D = Vulnerabilidade atribuída à Declividade.

As tabelas 7, 8 e 9 mostram os valores calculados para os temas Amplitude do Interflúvio (G), Amplitude Altimétrica (A) e Declividade (D).

Tabela 7 – Valores de vulnerabilidade para a amplitude do interflúvio (Adaptado de Crepani et al., 2001).

Amplitude Do Interflúvio (M)	Vuln
500 - 750	2,8
250 - 500	2,9
<250	3,0

mapeada com base em Silva et al. (2021), de acordo com o grau de vulnerabilidade, conforme tabela 10.

Tabela 10 – Vulnerabilidade para o critério Uso e Cobertura da Terra (Adaptado de Silva et al., 2021).

Classes de Uso e Cobertura	Vulnerabilidade
Formação Florestal	1,0
Formação Savânica e Água	1,5
Cultura Anual e Perene, Formação Campestre e Outras Formações Naturais não Florestais	2,0
Pastagem	2,5
Afloramento Rochoso, Mineração e Área Urbanizada	3,0

Mapa de vulnerabilidade a processos erosivos

A classificação do grau de estabilidade ou vulnerabilidade foi realizada de acordo com as relações de morfogênese e pedogênese, por meio da análise integrada dos critérios e subcritérios.

Nos casos em que predominou a morfogênese, prevaleceram os processos erosivos modificadores do relevo.

Onde predominou a pedogênese, prevale-

ceram os processos de formação de solo (Crepani et al., 1996). Assim, áreas mais estáveis (prevalência de pedogênese) apresentaram valores próximos a 1,0.

As áreas com grau de vulnerabilidade intermediárias (equilíbrio entre a pedogênese e a morfogênese), valores próximos a 2,0 e, por fim, aquelas mais vulneráveis (prevalência de morfogênese), valores próximos a 3,0.

Para isto, foram utilizadas operações de álgebra de mapas, com vistas a integrar os dados temáticos de geomorfologia, geologia, clima, pedologia e uso e cobertura da terra.

Todo o processo foi realizado no software QGIS 3.16-Hannover, por meio da ferramenta de reclassificação por tabela, tomando como base a tabela 11.

Tabela 11 – Classes de estabilidade/vulnerabilidade das unidades de paisagem (Adaptado de Crepani et al., 2001).

Grau de Vulnerabilidade	Valores
Estável	$1,0 \leq V \leq 1,4$
Moderadamente Estável	$1,4 \leq V \leq 1,8$
Medianamente Estável/Vulnerável	$1,8 \leq V \leq 2,3$
Moderadamente Vulnerável	$2,3 \leq V \leq 2,7$
Vulnerável	$2,7 \leq V \leq 3,0$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente pesquisa, a partir das operações de álgebra de mapas implementadas sobre os mapas temáticos de geomorfologia, geologia, clima, pedologia e uso e cobertura da terra, obteve o mapa síntese de vulnerabilidade natural à perda de solos para a bacia hidrográfica do Rio Boa Viagem, Ceará, Brasil.

Além disso, os valores obtidos de vulnerabilidade foram organizados em mapas individuais, com o objetivo de apresentar os graus de vulnerabilidade para cada critério.

Vulnerabilidade para os critérios

Em relação ao critério Geomorfologia, as formas com topos tabulares situam-se em sua maioria na porção oeste da bacia, na Serra das Matas, formada predominantemente por altitudes acima de 400 metros de altitude, bem como na porção sul, de forma menos representativa, em altitudes que variam entre 410 e 750 metros de altitude.

Essas áreas apresentam dissecação fraca a muito fraca, com baixo grau de entalhamento, relevo plano a suave ondulado e declividades máximas de 8%, caracterizando-se como de vulnerabilidade intermediária, tendo sido atribuído valor 2,0.

Quanto às formas com topo convexo, estas se distribuem ao longo da Depressão Sertaneja, nas porções noroeste e sul da bacia. Ocorrem predominantemente em altitudes abaixo de 400 metros, em áreas com relevo plano a ondulado, com declividades máximas de 20% e baixo grau de entalhamento. Diante disso, foi atribuído valor 2,0, pois essas unidades se caracterizam como de vulnerabilidade intermediária.

As formas com topos aguçados localizam-se quase em sua totalidade na porção central e sul da bacia, nas Serras Branca, dos Machado e das Matas, com altitudes acima de 400 metros, com relevo ondulado a montanhoso, declividade predominante entre 20 e 45% e médio grau de entalhamento. Essas áreas foram consideradas vulneráveis, tendo sido atribuído valor 3,0.

O grau de vulnerabilidade para o critério geomorfologia predominante na área estudada foi o grau medianamente estável/vulnerável com 2.104,90 km² (79,33%), e vulnerável, que totalizou 548,31 km² (20,67%).

Quanto ao critério Geologia, a área estudada é dominada em sua totalidade por rochas ígneas e metamórficas, representadas pela Suíte Intrusiva Tamboril-Santa Quitéria (1,1), Granitoides Diversos (1,1), Unidade Algodões (1,3), Unidade Canindé (1,3) e Complexo Cruzeta (1,3), todos dispostos nas porções a oeste e leste áreas da bacia, apresentando valores de vulnerabilidade estáveis, compreendendo 84,05% da área. Na porção central da bacia foram mapeadas as áreas mais vulneráveis, com valores de 2,9 na escala de vulnerabilidade, compreendendo 15,95% da bacia, abrangendo a Unidade Independência, que possui como rochas típicas dominantes os metacalcários.

No tocante ao critério Solos, a principal característica considerada para estabelecer as classes de vulnerabilidade é o seu grau de desenvolvimento ou maturidade (Crepani et al., 2001). Esta variável apresenta quatro classes de valores entre 1 e 3. Na bacia estudada, foram mapeadas duas classes de vulnerabilidade para o critério solos.

As classes de solos Argissolos, Luvisolos, Chernossolos e Planossolos receberam valores de vulnerabilidade 2,0. Estes ocupam a maior parte da área da bacia, totalizando 1.718,08 km². As classes Neossolos, Vertissolos e Afloramento Rochoso receberam valores de vulnerabilidade 3,0 sendo, portanto, caracterizados como vulneráveis, ocupando uma área de 932,39 km². Assim, foi possível constatar que 65% da área é composta por solos medianamente estáveis/vulneráveis e 35% por solos vulneráveis, o que indica a necessidade de adoção de diretrizes de manejo e conservação dos solos nos planos de bacia e demais documentos e políticas de gestão ambiental.

No geral, as principais restrições dos argis-

solos vermelho-amarelos, que na área estudada totalizam 764,37 km² (28,81%), são relacionadas à fertilidade, em alguns casos, e susceptibilidade à erosão. São caracterizados pela presença de horizonte diagnóstico B textural, apresentando acúmulo de argila em profundidade devido à mobilização e perda de argila da parte mais superficial do solo (EMBRAPA, 2006).

Os luvisolos apresentam limitações relativas ao uso e relacionam-se à quantidade de pedras no horizonte superficial, o que pode dificultar o uso de mecanização agrícola e a suscetibilidade à compactação.

Devido à mudança textural abrupta, são suscetíveis à erosão. Há também a limitação quanto à água disponível no solo, sendo maior em locais mais secos (clima semiárido). Na bacia estudada, recobrem uma área de 717,10 km² ou 27,03%.

Em relação aos planossolos, estes se caracterizam por serem rasos a moderadamente profundos, com baixa capacidade de infiltração e baixa fertilidade natural, apresentando altas concentrações de sais e susceptibilidade à erosão. Recobrem aproximadamente 5% da área estudada.

Os chernossolos variam de solos pouco profundos a profundos, podendo apresentar suscetibilidade aos processos erosivos pela presença de horizonte subsuperficial B textural ou de horizonte com caráter argilúvico (EMBRAPA, 2006).

Os neossolos compreendem solos constituídos por material mineral ou por material orgânico pouco espesso, pois são solos novos, pouco desenvolvidos a partir dos mais diversos tipos de rochas (EMBRAPA, 2006; Streck et al., 2008), sendo considerados solos mais vulneráveis, com pequeno desenvolvimento pedogenético, caracterizado por pequena profundidade (rasos), por predomínio de areias quartzosas ou pela presença de camadas distinta herdadas dos materiais de origem.

Todas estas características indicam pequeno desenvolvimento do solo. Quanto aos vertissolos, estes possuem sérias restrições à percolação da água, apresentam textura argilosa e pouquíssima resistência a erosão (Sartori et al., 2005).

A bacia apresentou precipitação média anual de 667 mm a 875,11mm entre os anos de 1981 e 2020. A intensidade pluviométrica variou entre 166 mm e 218 mm, o que caracteriza, em termos de vulnerabilidade, a bacia como estável a moderadamente estável.

Quanto ao uso e cobertura da terra, a área da bacia possui 68,25% de cobertura vegetal da classe Formação Savânica, que engloba os tipos Caatinga

Arbórea (Floresta Caducifólia Espinhosa) e Caatinga Arbustiva Densa.

A Formação Florestal Subcaducifólia Tropical Pluvial (Mata Seca) abrange 3,79% da área da bacia. As áreas vegetadas, portanto, abrangem 1.942,44 km².

Trata-se de uma região com baixa vocação agrícola, apesar do percentual ocupado por esta classe, em razão dos tipos de solo existentes na região, que possuem baixa aptidão agrícola associada à baixa pluviosidade da região.

As atividades agrícolas abrangem 725 km² (27,35%) e ocorrem principalmente ao longo dos recursos hídricos, por meio de agricultura de subsistência com pouca expressividade no âmbito estadual, destacando-se as culturas de milho e feijão e no tocante à pecuária, destacam-se as criações de galináceos, ovinos e bovinos, também com pouca expressividade.

As áreas urbanizadas abrangem 0,32% da bacia e áreas com solo exposto 0,02%, ambas com pouca expressividade no contexto da bacia.

As classes de vulnerabilidade relativas ao uso e cobertura da terra predominantes na área são a moderadamente estável (67,62%) e moderadamente vulnerável (27,02%).

A bacia está localizada entre duas Áreas Suscetíveis à Degradação (ASD), quais sejam, Irauçuba/Centro Norte e Inhamuns, além de estar inserida numa área classificada como muito degradada (IPECE, 2010). Carvalho et al., (2020) destacam que a estrutura e o padrão do uso e cobertura da terra afeta diretamente a vegetação natural, pois uma vez degradado, indiretamente ocasiona a supressão da vegetação nativa, propiciando alteração do meio biótico, acarretando a perda de habitat da sua microfauna, propiciando pragas e diminuição de nichos ecológicos. A figura 3 mostra a espacialização da vulnerabilidade para os critérios utilizados.

Vulnerabilidade a processos erosivos

Após definida e caracterizada a vulnerabilidade a processos erosivos para os critérios, conforme exposto anteriormente, procedeu-se a coleta das opiniões dos especialistas em relação aos critérios no tocante à vulnerabilidade a processos erosivos. Para isto, foi elaborado um questionário para agregar os julgamentos. Nesta pesquisa, uma apresentação foi realizada tendo sido detalhados os objetivos, além de ter sido disponibilizada uma descrição detalhada dos cinco critérios, para que se alcançasse a melhor consistência possível nas respostas.

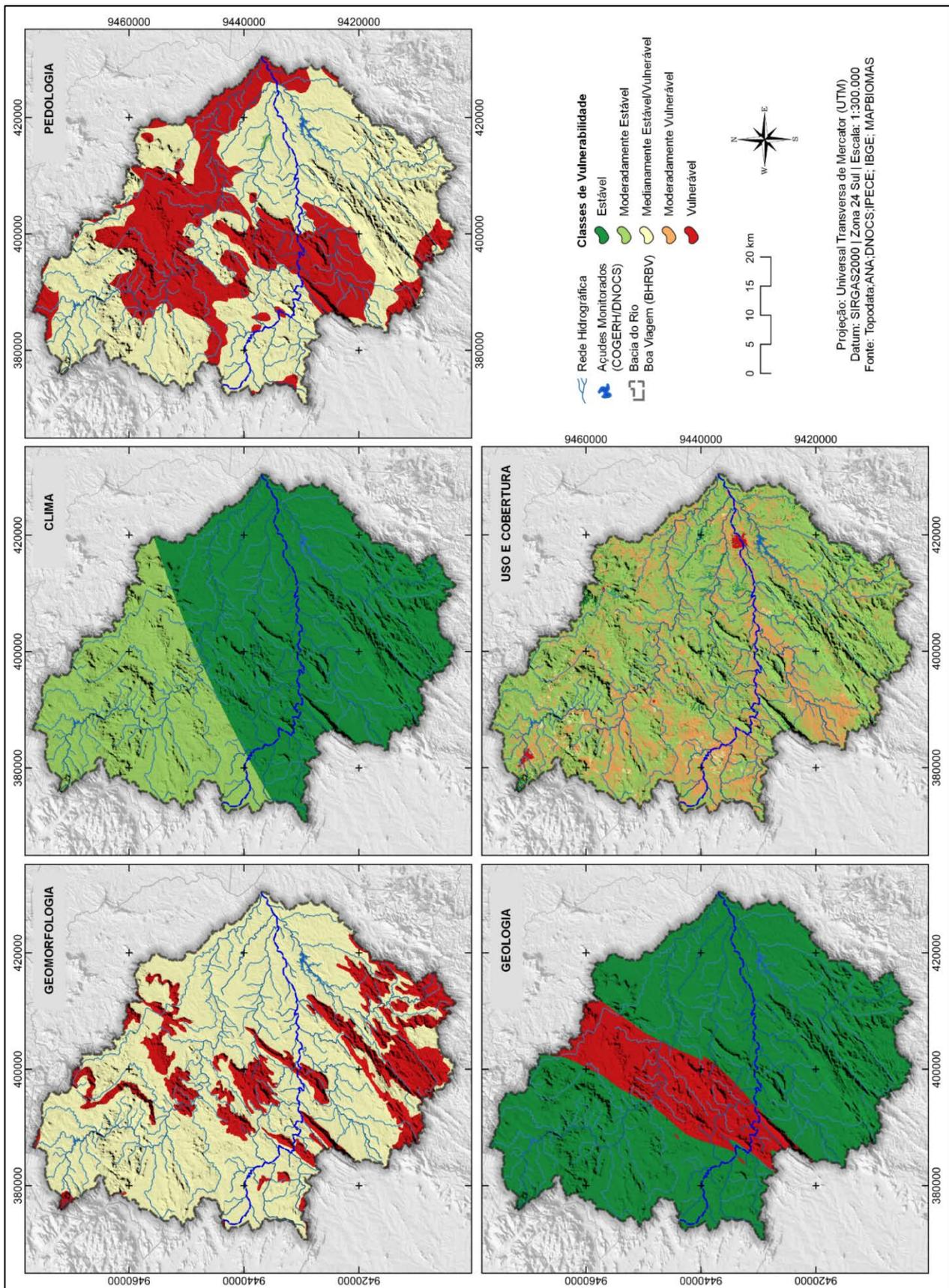


Figura 3 – Mapas de espacialização da vulnerabilidade para os critérios geomorfologia, clima, pedologia, geologia e uso e cobertura.

Vulnerabilidade a processos erosivos

Após definida e caracterizada a vulnerabilidade a processos erosivos para os critérios, conforme exposto anteriormente, procedeu-se a coleta das

opiniões dos especialistas em relação aos critérios no tocante à vulnerabilidade a processos erosivos. Para isto, foi elaborado um questionário para agregar os julgamentos. Nesta pesquisa,

uma apresentação foi realizada tendo sido detalhados os objetivos, além de ter sido disponibilizada uma descrição detalhada dos cinco critérios, para que se alcançasse a melhor consistência possível nas respostas.

Para esta pesquisa foram consultados dez especialistas que então realizaram a avaliação pareada utilizando as variáveis linguísticas propostas na tabela 2. Para calcular os pesos dos critérios, as comparações *fuzzy* pareadas foram combinadas para cada um dos critérios. Para isto, utilizou-se

o método da média geométrica (equações 1 a 3), que resultou nos valores mostrados na tabela 12, cuja consistência das opiniões, com base na equação 4 resultaram num CR = 0,09, mostrando, portanto, que a matriz é consistente.

Utilizando-se os valores obtidos na tabela 12, a importância de cada critério foi calculada utilizando-se o método da Extensão Sintética *Fuzzy* por meio das equações 6 a 9, que resultaram nos valores de extensão sintética *fuzzy* (S_i), conforme mostrado na tabela 13.

Tabela 12 – Média geométrica dos TFN da matriz de comparação pareada.

Critério	Geologia	Geomorfologia	IP	Uso	Pedologia
Geologia	(0.50, 1.00, 1.50)	(0.33, 0.40, 0.50)	(0.29, 0.33, 0.40)	(0.29, 0.33, 0.40)	(0.33, 0.40, 0.50)
Geomorfologia	(2.00, 0.40, 3.00)	(0.50, 1.00, 1.50)	(1.00, 1.50, 2.00)	(0.50, 0.67, 1.00)	(0.50, 0.67, 1.00)
IP	(2.50, 0.33, 3.50)	(0.50, 0.67, 1.00)	(0.50, 1.00, 1.50)	(0.33, 0.40, 0.50)	(0.50, 0.67, 1.00)
Uso	(2.50, 0.33, 3.50)	(1.00, 1.50, 2.00)	(2.00, 2.50, 3.00)	(0.50, 1.00, 1.50)	(1.50, 2.00, 2.50)
Pedologia	(2.00, 0.40, 3.00)	(1.00, 1.50, 2.00)	(1.00, 1.50, 2.00)	(0.40, 0.50, 0.67)	(0.50, 1.00, 1.50)

Tabela 13 – Valores de extensão sintética (S_i) para os critérios.

Critério	Extensão Sintética Fuzzy (S_i)		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Geologia	0,043	0,112	0,144
Geomorfologia	0,110	0,192	0,370
Clima	0,106	0,139	0,324
Uso	0,184	0,333	0,542
Pedologia	0,120	0,223	0,399

Por fim, o cálculo da importância relativa de cada um dos cinco critérios foi realizado por meio da defuzzificação dos valores *fuzzy* de importância relativa (peso) por meio da equação 10, que resultou nos valores dispostos na tabela 14:

Tabela 14 – Importância relativa (peso) dos critérios após a defuzzificação.

Critérios	Peso
Geologia	0,089
Geomorfologia	0,201
Clima	0,171
Uso	0,317
Pedologia	0,222

Tomando-se como base a equação 13, obteve-se o modelo mostrado na equação 15:

$$V = 0,089G + 0,201R + 0,171C + 0,317U + 0,222S \quad (15)$$

Onde, G = Geologia; R = Geomorfologia; C = Clima; U = Uso e Cobertura; e S = Pedologia.

A partir da aplicação das equações 12 e 15, obteve-se o mapa representado na figura 4 que representa a vulnerabilidade da bacia hidrográfica do Rio Boa Viagem a processos erosivos.

A BHRBV apresentou quatro classes de vulnerabilidade, a saber: estável, moderadamente estável, medianamente estável/vulnerável, moderadamente vulnerável.

A classe estável abrange 0,03% da área estudada, totalizando 0,75 km². Localiza-se sobre áreas com declividade variando entre 0 e 8%, com relevo plano a suave ondulado e altitudes de até 300 metros. A área é predominantemente composta por vegetação nativa. De acordo com Almeida e Cunha (2012), a vegetação exerce importante papel na estabilização dos geoambientes, pois protege o solo de processos erosivos, facilita a distribuição, infiltração e acúmulo de águas pluviais, além de influenciar nas condições climáticas. Nessas classes predominam processos pedogenéticos.

Com relação à classe moderadamente estável, esta abrange 34,24% da área, perfazendo 908,58 km², predominando sobre argissolos e luvisolos, ocorrendo usos mais voltados para atividades antrópicas como pastagens e atividades agropecuárias, nas áreas mais planas, com relevo suave e suave ondulado. Nas áreas mais

declivosas, com relevo ondulado, pode-se verificar a ocorrência de vegetação com

formação savânica. Nessas áreas, a exemplo da anterior, predominam processos pedogenéticos.

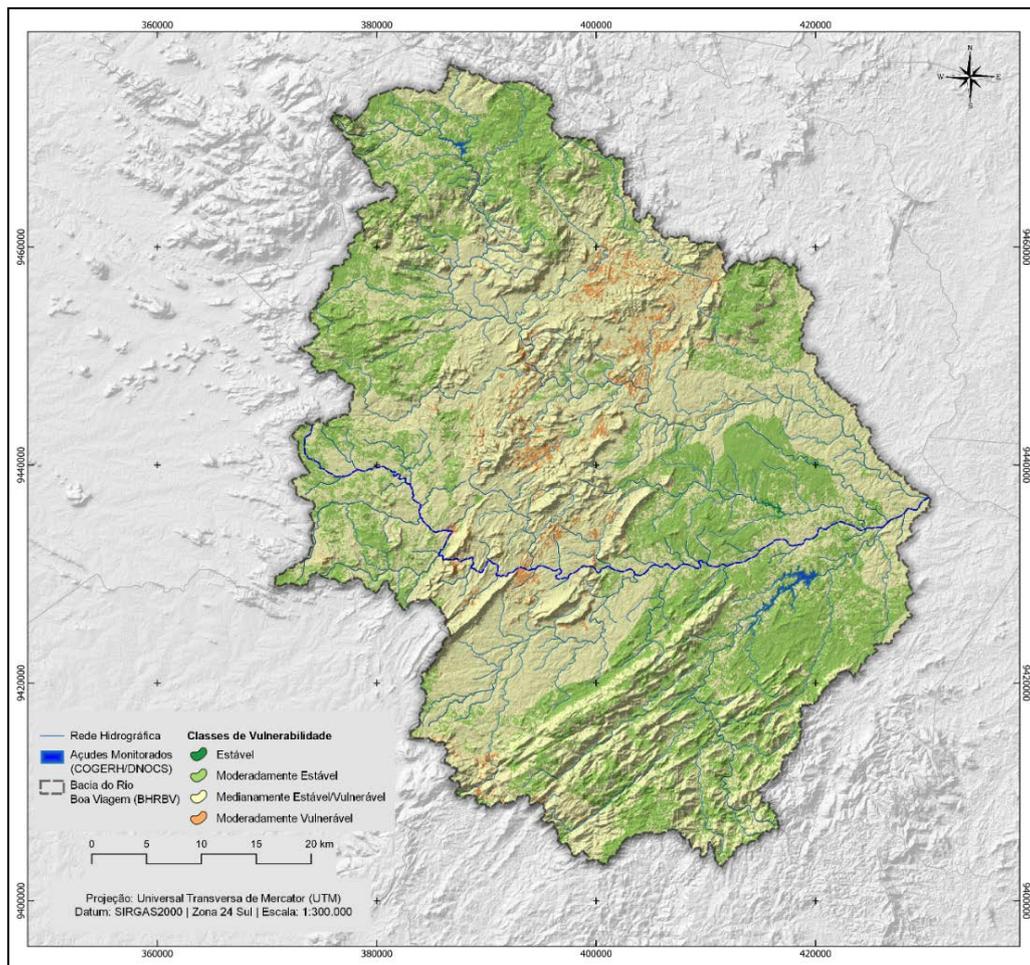


Figura 4 – Mapa de Vulnerabilidade a processos erosivos na bacia hidrográfica do Rio Boa Viagem.

A classe de vulnerabilidade medianamente estável/vulnerável ocorre por toda a extensão da bacia, sendo a mais representativa, ocupando uma área de 1.675,18 km² (63,14%). Esta classe corresponde à transição entre as unidades mais estáveis e as mais vulneráveis, havendo um equilíbrio entre os processos pedogenéticos e morfogenéticos.

Por fim, as áreas moderadamente vulneráveis, nas quais predominam processos de morfogênese, portanto, modificadores do relevo, predominam na porção central da bacia e algumas áreas nas

Serras do Machado e das Matas, com altitudes acima de 400 metros, recobrendo 67,17 km² (2,53%), prevalecendo neossolos litólicos e áreas com declividades variando entre 3% e 20%, com relevo plano a ondulado, topos de morros aguçados e com a presença de vegetação e atividades agropecuárias.

O gráfico da Figura 5 mostra os quantitativos em km² das áreas correspondentes às classes de vulnerabilidade a processos erosivos na bacia hidrográfica do rio Boa Viagem.

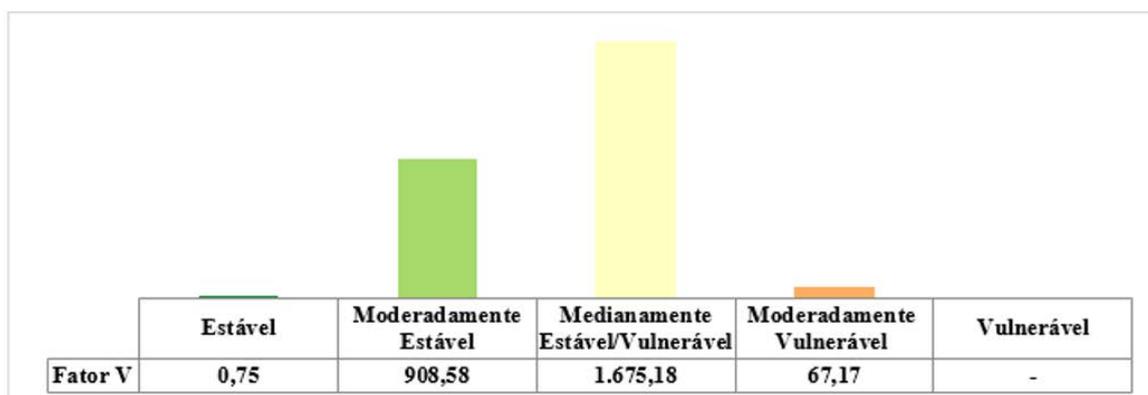


Figura 5 – Área em km² das classes de vulnerabilidade a processos erosivos na Bacia Hidrográfica do Rio Boa Viagem.

CONCLUSÕES

O método *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (FAHP) foi aplicado para calcular os pesos relativos dos critérios.

Para os subcritérios aplicou-se a ponderação proposta por Crepani et al. (2001). A lógica *fuzzy* compensa a imprecisão e incerteza originada nos julgamentos dos decisores. Foi utilizado o método adaptado de Chang (1996), bem como números *fuzzy* triangulares (NFTs), pois estes possuem a capacidade de tratar muito bem as informações com alto grau de incerteza e de indefinição, características também presentes nos processos naturais. A utilização de dados de sensoriamento remoto e técnicas de SIG aliados à análise integrada dos critérios relativos à Pedologia, Geologia, Geomorfologia, Clima e Uso e Cobertura da Terra resultou no mapa de vulnerabilidade a processos erosivos. Com isso foi gerado o mapa síntese que permitiu identificar e analisar a vulnerabilidade com base nos

conceitos de ecodinâmica, com fundamento na relação morfogênese e pedogênese.

A vulnerabilidade a processos erosivos na área estudada variou de 1,4 a 2,6, categorizadas em três unidades de paisagem, quais sejam, estáveis (15,02%), moderadamente estáveis (24,01%), medianamente estáveis/vulneráveis (58,40%) e moderadamente vulneráveis (2,57%). Na média, a vulnerabilidade da bacia apresentou valor de 1,9, predominando, portanto, o grau medianamente estável/vulnerável na escala de vulnerabilidade a perda de solos.

Ressalta-se a importância das técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento na elaboração de estudos ambientais, facilitando a obtenção e cruzamento de dados, aliados ao conhecimento teórico e da área de estudo, bem como à visão sistêmica que permitiu compreender a paisagem da área objeto do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALYAMANI, R. & LONG, S. The Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process in Sustainable Project Selection. *Sustainability*, v. 12, n. 20, p. 8314, 2020.
- ALYAMANI, R.; LONG, S.; NURUNNABI, M. Evaluating Decision Making in Sustainable Project Selection Between Literature and Practice. *Sustainability*, v. 13, n. 15, p. 8216, 2021.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Base Hidrográfica Ortocodificada. - Brasília: ANA, 2015. 17 p.
- BÜYÜKÖZKAN, G. & FEYZIOĞLUO, O. A fuzzy-logic-based decision-making approach for new product development. *International Journal of Production Economics*, v. 90, n. 1, p. 27–45, 2004.
- CARMO, J.P. DE A; SOUZA, G.F.; POLIDORO, M.; LOLLO, J.A. Análise da fragilidade ambiental em áreas urbanas - O caso do município de Londrina – PR. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR. Curitiba. PR. INPE. *Anais...* Curitiba: INPE, 2011, p. 0855.
- CARVALHO, C.M.; BERNARDI, E.S.; FANTINEL, R.A.; FELDKIRCHER, T.; CRUZ, R.C. Fragilidade Ambiental Frente ao Uso do Solo no Alto Camaquã, RS. *Revista de Geografia*, v. 37, n. 1, p. 324–338, 2020.
- CEARÁ. Assembleia Legislativa. **Caderno regional da sub-bacia do Banabuiu / Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos.** Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. Fortaleza: INESP. 2009. 116p.
- CHANG, C.W.; WU, C.R.; LIN, H.L. Applying fuzzy hierarchy multiple attributes to construct an expert decision-making process. *Expert Syst. Appl.*, v. 36, p. 4, 2009.
- CHANG, D.Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, v. 95, Issue 3, Pages 649-655, 1996.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; L.G.; AZEVEDO, L.G.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T.G.; DUARTE, V. **Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento Ecológico-Econômico.** São José dos Campos. INPE, maio de 1996, 18p. (INPE6145-PUD/028). Disp.: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/rep/6qtX3pFwXQZ3ukuKE/C98tB>. Acessado em: 06abr2022.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.C.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T.; BARBOSA, C. **Sensoriamento Remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento Ecológico-Econômico e ao ordenamento territorial.** INPE. São José dos Campos. São Paulo. 2001. Disponível em: <http://sap.ccst.inpe.br/artigos/CrepaneEtAl.pdf>. Acessado em: 10abr2022.
- DALLA CORTE, A.P.; KLEIN HENTZ, A.M.; DOUBRAWA, B.; SANQUETA, C.R. Environmental fragility of Iguazu river watershed. Paraná. Brazil. **Bosque**, v. 36, n. 2, p. 287-297, 2015.
- DEMARCHI, J.C.; PISANI, R.J.; ZIMBACK, C.L. Análise da Vulnerabilidade à Erosão da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas por meio de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento. **Revista Geografia e Pesquisa**, Ourinhos, v.7, n.1, 2013.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2006.
- FLORENZANO, T.G (Org.). **Geomorfologia: Conceitos e Tecnologias atuais.** 318p. São Paulo: Oficina de Textos. 2008.
- FRANCISCO, H.R.; CORRÊIA, A.F.; FEIDEN, A. Classification of areas suitable for fish farming using geotechnology and multicriteria analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 8, p. 394, 2019.
- FUCK JÚNIOR, S.C.F. Subsídio à Gestão Ambiental: Descrição Fisiográfica e Análise Funcional das Bacias Hidrográficas do Ceará. **Geoambiente On-line**, Goiania, n. 10, p. 01–31, 2013.
- GANGULY, K.K. & GUIN, K.K. A fuzzy AHP approach for inbound supply risk assessment. Benchmarking: **An International Journal**, v. 20, p. 129-146, 2013.

- GUERRERO, J.V.R.; LOLLO, J.A.; MOSCHINI, L.E.; LORANDI, R. Carta de Fragilidade Ambiental como instrumento de planejamento e conservação de unidades aquíferas: o caso da bacia do Rio Clarinho. SP. **Caderno de Geografia**, v. 28, n. 53, 2018.
- GUIMARÃES, F.S.; CORDEIRO, C.M.; BUENO, G.T.; CARVALHO, V.L.M.; NERO, M.A. Uma Proposta para Automatização do Índice de Dissecação do Relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 18, n. 1, 2017.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapeamento de recursos naturais do Brasil escala 1:250.000**. Rio de Janeiro: Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 2018. 8 p.
- IPECE – INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Ceará em Mapas Informações georreferenciadas e espacializadas para os 184 municípios cearenses. Municípios Susceptíveis à Desertificação no Estado do Ceará**. Fortaleza. Gerência de Estatística, Geografia e Informação. 2010.
- KANNAN, D.; JABBOUR, A.B.L. DE S.; JABBOUR, C.J.C. Selecting green suppliers based on GSCM practices: Using fuzzy TOPSIS applied to a Brazilian electronics company. **European Journal of Operational Research**, v. 233, n. 2, p. 432–447, 2014.
- KARA, Y. Measuring the Sustainability of Cities in Turkey with the Analytic Hierarchy Process. **Open Journal of Social Sciences**, v. 7, p. 322–334, 2019.
- LIRA, K.C.S.; FRANCISCO, H.R.; FEIDEN, A. Classificação de fragilidade ambiental em bacia hidrográfica usando lógica Fuzzy e método AHP. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 34, n. 1, 2022.
- MAPBIOMAS. **Coleção 5 da série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil**. 2020. Disponível em: <http://mapbiomas.org>. Acessado em: 08abr2022.
- NASCIMENTO MACHADO, L.; LOSS, A.; ZILLI BACIC, I. L.; DORTZBACH, D.; DE CAMPOS LALANE, H. Vulnerabilidade à perda de solo na microbacia Lajeado Pessegueiro, Brasil. **Scientia Agropecuaria**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 159–168, 2017.
- OLIVEIRA, E.S.; MOREAU, A.M.S.S. Fragilidade Ambiental da Península de Maraú-Bahia. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 38, n. 3, 2021.
- QGIS Development Team, 2022. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- ROSA, R.M. & FERREIRA, V.O. Vulnerabilidade Natural à Perda de Solos na Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos Afluentes Mineiros do Baixo Paranaíba. **Revista Georaguaiá**, [S. l.], v. 11, n. Especial, p. 107–131, 2021.
- ROSENDI, E.E.Q. **Vulnerabilidade à seca nas regiões semiárida brasileira e portuguesa: uma avaliação baseada em lógica fuzzy**. 2019. 288p. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade do Porto, Portugal.
- ROSS, J. L.S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais Antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, [S. l.], v. 8, p. 63–74, 2011.
- SAATY, T.L. & VARGAS, L.G. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. **Springer Science & Business Media**, New York. 346 p. 2012.
- SAATY, T.L. & VARGAS, L.G. **The Logic of Priorities: The Logic of Priorities Applications in Business, Energy, Health, and Transportation**. New York: Springer. 386 p. 1982.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A.M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: **Classificação**. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05–18, 2005.
- SILVA, K.N.D.; FERREIRA, E.C.; LOUREIRO, G.E. Fragilidade Ambiental da Sub-Região Hidrográfica Itacaiúnas (SRHI). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, 2021.
- SILVA, T.A.; DUARTE, M.L.; GATO, L.C.; GUANDIQUE, M.E.G. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio Candeias, RO. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 058–068, 2020.
- SPÖRL, C. & ROSS, J.L.S. Análise Comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. **GEOSP Espaço e Tempo (Online)**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 39–49, 2004.
- STEFANO, N.M. **Crítérios para avaliação da gestão de periódicos científicos eletrônicos sob a ótica do capital intelectual**. 2014. 214p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLANT, E.; NASCIMENTO, P.C; SCHENEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS; 2008.
- SUN, C.C. A performance evaluation model by integrating fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 12, p. 7745–7754, 2010.
- TERUYA JUNIOR, H.; LASTORIA, G.; CORREA, L.C.; DALMAS, F.B.; PARANHOS FILHO, A.C. Vulnerabilidade Natural e Ambiental da Bacia Hidrográfica Rio Formoso, Mato Grosso do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 41 – 42, p. 41–50. 2018.
- TESFAMARIAM, S. & SADIQ, R. Risk-based environmental decision-making using fuzzy analytic hierarchy process (F-AHP). **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 21, n. 1, p. 35–50, 2006.
- TREVISAN, D.P.; MOCHINI, L.E.; DIAS, L.C.C.; GONÇALVES, J.C. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de São Carlos-SP. **R. Ra'e Ga Curitiba**, v. 44, p. 272–288, 2018a.
- TREVISAN, D.P.; MOSCHINI, L.E.; TREVISAN, B. P. 2018. Avaliação da vulnerabilidade dos solos à erosão no município de São Carlos - SP. **Revista de Geografia**, v. 35, n. 2, p. 354, 2018b.
- TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro. IBGE. Diretoria Técnica. SUPREN. 91 p., 1977.
- VILAR ALMEIDA, N. & BAPTISTA DA CUNHA, S. A Cobertura Vegetal e sua Importância na Análise Morfodinâmica da Bacia Hidrográfica do Rio Taperoá – Nordeste do Brasil/ Paraíba. **Revista Geonorte**, [S. l.], v. 3, n. 6, p. 365–378, 2012.
- WALDBURGER, T. C. M. **Mapeamento Geoambiental da Zona Costeira dos Municípios de Maraú e Camamu - BA**. 2014. p. 60. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente). Universidade Estadual de Santa Cruz.
- YAGER, R.R. On a general class of fuzzy connectives. **Fuzzy Sets and Systems**, v 4, n. 3, p. 235–242, 1980.
- ZADEH, L.A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.

*Submetido para publicação em 31 de maio de 2022
Aceito para publicação em 15 de fevereiro de 2023*