



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 9, nº 1 (2023)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2023v9n1ID31583>



Mapeamento de Vulnerabilidade Ambiental da Sub-bacia do Rio Bodó, na região da Serra de Santana, estado do Rio Grande do Norte, Brasil

Environmental Vulnerability Mapping of the Bodó river sub-basin, in the region of Serra de Santana, Rio Grande do Norte State, Brazil

Raquel Cardoso Araújo¹; Daniel Dantas Moreira Gomes²; José Yure Gomes dos Santos³; Marcelo Martins de Moura-Fé⁴.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Geografia (GEOCERES)/Caicó/RN, Brasil. Email: raquel.araujo.081@ufrn.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6990-1021>

² Universidade de Pernambuco - UPE. Garanhuns/PE, Brasil. Email: daniel.gomes@upe.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6868-040X>

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Departamento de Geografia do CERES/Caicó, RN, Brasil. Email: jose.yure.santos@ufrn.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9840-8132>

⁴ Universidade Regional do Cariri. Departamento de Geociências - Crato/Ceará, Brasil. Email: marcelo.mourafe@urca.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0336-557X>

Resumo: As bacias hidrográficas constituem um sistema natural equilibrado e são importantes unidades de planejamento dos recursos hídricos que compõem os sistemas ambientais. Considerando a relevância do planejamento e gestão ambiental na atualidade este artigo tem por objetivo realizar o mapeamento de vulnerabilidade ambiental da sub-bacia do Rio Bodó, na região da Serra de Santana, RN, com a aplicação de mapas e análise integrada de suas variáveis físicas e ambientais. Para isso, foram confeccionados mapas de declividade, índice de dissecação, geologia, pedologia e vegetação. Esses mapas receberam pesos, conforme sua estabilidade/vulnerabilidade morfodinâmica e, posteriormente, combinados em álgebra de mapas. A carta gerada com a combinação desses fatores apresentou cinco classes de vulnerabilidade para a sub-bacia em questão: muito fraca, fraca, moderada, forte e muito forte. É importante destacar a necessidade de estudos com vistas a quantificar com maior acurácia a vulnerabilidade ambiental em áreas de sub-bacias e, desse modo, dirimir o planejamento e a gestão ambiental dos seus recursos com o manejo sustentável do seu território.

Palavras-chave: Álgebra de Mapas; Bacia Hidrográfica; Recursos Hídricos; Geoprocessamento.

Abstract: The watersheds constitute a balanced natural system and are important planning units of water resources that make up the environmental systems. Considering the relevance of planning and environmental management today, this article aims to perform the mapping of environmental vulnerability of the Bodó River sub-basin, in the region of Serra de Santana, RN, with the application of algebra of maps and integrated analysis of its physical and environmental variables. For this, maps of slope, dissection index, geology, pedology and vegetation were made. These maps were weighted according to their morphodynamic stability/vulnerability, and then combined in map algebra. The map generated with the combination of these factors presented five vulnerability classes for the sub-basin in question: very weak, weak, moderate, strong and very strong. It is important to emphasize the need for studies aimed at quantifying with greater accuracy the environmental vulnerability in sub-basin areas and, in this way, to dictate the planning and environmental management of its resources with the sustainable management of its territory.

Keywords: Map Algebra; Watershed; Water Resources; Geoprocessing.

Recebido: 23/02/2023; Aceito: 16/05/2023; Publicado: 10/06/2023

1. Introdução

Os estudos de vulnerabilidade ambiental incluem o mapeamento, a análise e o conhecimento das potencialidades e fragilidades de uma determinada área de estudo. Essas pesquisas mostram sua importância ao identificar o que compromete o equilíbrio ambiental do lugar com base no grau de estabilidade/vulnerabilidade das categorias morfodinâmicas de análise da paisagem (TRICART, 1977).

As bacias hidrográficas constituem um sistema natural equilibrado, onde alterações do seu meio físico podem comprometer sua funcionalidade, como a extração da cobertura vegetal pode afetar a temperatura, o regime hídrico e a resistência do solo (LIRA; FRANCISCO; FEIDEN, 2022). Para Fistarol e Santos (2020), áreas com coberturas do solo inadequadas podem apresentar elevados índices erosivos que potencialmente comprometem a estabilidade natural das bacias hidrográficas, ocasionando sérios danos ambientais, como a redução da capacidade produtiva dos solos, o assoreamento dos cursos d'água e dos reservatórios, além da poluição das fontes de água (SANTOS *et al.*, 2012). Ceconi *et al.* (2018) ressaltam que as bacias de captação para abastecimento público merecem atenção especial por parte dos gestores, pois delas dependem a quantidade e a qualidade da água, elemento indispensável à sustentabilidade da vida e recurso fundamental para diversas atividades humanas. Além disso, a qualidade da água de um manancial, além dos seus usos, depende das atividades que se desenvolvem em sua bacia, por isso, é de suma importância o planejamento ambiental dessas unidades levando-se em consideração a interação e integração dos sistemas que compõem o ambiente (SILVA; SANTOS; LEAL, 2016).

Considerando esses pressupostos, vários estudos já foram empregados para a análise de vulnerabilidade ambiental e álgebra de mapas aplicados para bacias ou sub-bacias hidrográficas, destacando-se os de Nicolau (2018); Rocha e Magri (2022); Lira e Feiden (2022); Zanella *et al.* (2013), dentre outros que preconizam a importância dessas análises, tendo em vista que vários autores e autoras apontam a bacia hidrográfica como uma unidade ambiental que possibilita tratar dos elementos e da dinâmica necessária ao planejamento e a gestão dos sistemas ambientais (SOUZA; VALE; NASCIMENTO, 2013).

O planejamento e a gestão dos recursos ambientais no presente século são questões relevantes, principalmente, considerando as crescentes mudanças climáticas e a degradação dos solos em ambientes frágeis com altos riscos de desertificação, como ocorre em regiões de clima semiárido, como no Seridó Potiguar. Nessa perspectiva, os estudos de vulnerabilidade ambiental têm por objetivo essencial indicar as potencialidades e as limitações do uso e ocupação humana, com vistas a contribuir para o entendimento da realidade espacial e de possíveis intervenções na mesma (SANTOS *et al.*, 2006). Conforme Nicolau (2018, p. 294) a confecção do mapa de vulnerabilidade ambiental é um importante recurso que proporciona o entendimento dos processos antrópicos que incidem diretamente nos processos físicos naturais de uma dada bacia, com a perspectiva de entender quais áreas são potenciais ou restritas a um determinado tipo de uso. Por isso, esse instrumento é tão necessário, pois a identificação das áreas instáveis pode resultar na tomada de decisões, assim como, em medidas de conservação e aproveitamento sustentável do território.

É importante destacar que o uso/ocupação da terra é um dos fatores que mais agrava a degradação ambiental e acarreta a perda de solos. Assim como a presença de fatores limitantes, como a declividade, a rugosidade do terreno e a fragilidade natural dos solos, quando somados à ineficiente gestão ambiental dos recursos naturais podem potencializar a vulnerabilidade nos sistemas ambientais.

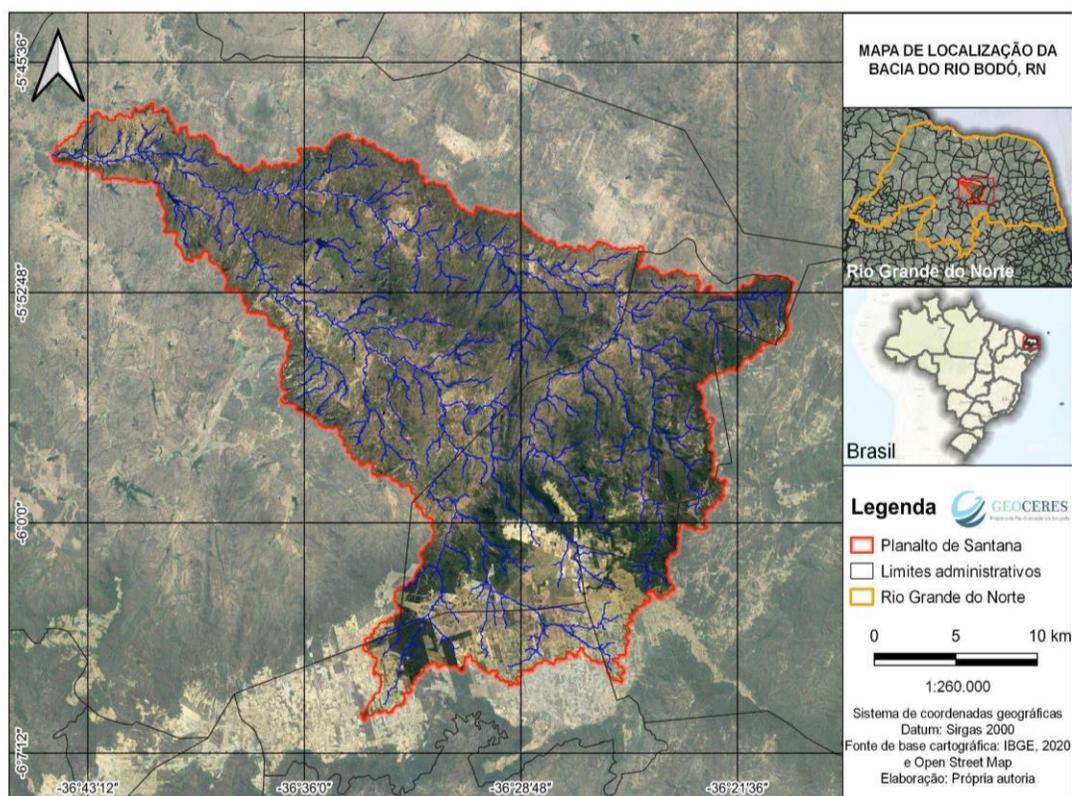
Considerando o exposto, justifica-se o emprego dessa metodologia de análise ambiental para a sub-bacia do Rio Bodó, no estado do Rio Grande do Norte, tendo em vista que a referida unidade abrange a área de, pelos menos, quatro municípios da microrregião da Serra de Santana, que consiste numa região de altitude, abrigando importantes sítios da geodiversidade, recursos naturais-ecológicos e abriga nascentes de rios das importantes bacias hidrográficas do estado. Além disso, a sub-bacia do Rio Bodó possui ainda alguns afluentes que banham essa região e alguns açudes e pequenos barramentos ao longo da bacia que servem de abastecimento e dessedentação animal para as comunidades locais que fazem uso desse recurso hídrico. Deve-se ressaltar que a sub-bacia em questão apresenta elevado índice de pressão antrópica sobre os sistemas ambientais, destacando-se o uso da terra para a agricultura, agropecuária extensiva, ocupação urbana e, recentemente, para a instalação de aerogeradores nas áreas de potencial eólico da Serra de Santana. Essa pressão sobre os sistemas ambientais pode acarretar na degradação dos solos, que envolve a redução dos potenciais recursos renováveis, levando ao abandono ou “desertificação” das terras (ALMEIDA; ARAÚJO; GUERRA, 2010), principalmente, se essa degradação ocorre em ambientes suscetíveis a processos de desertificação, como em ambientes semiáridos.

Deste modo, a carta de vulnerabilidade ambiental constitui uma importante ferramenta de análise a subsidiar o planejamento e a gestão ambiental para esta importante sub-bacia do estado, considerando a integração dos fatores físicos-ambientais que a compõem na análise de suas potencialidades e fragilidades frente ao uso/ocupação da terra e de seus

recursos hídricos. Sendo assim, o presente artigo objetivou realizar o mapeamento da vulnerabilidade ambiental para a Sub-bacia do Rio Bodó, no estado do Rio Grande do Norte/RN, com a aplicação de álgebra de mapas e análise multicritério a partir do uso de técnicas de Geoprocessamento e SIG para elaboração da carta de vulnerabilidade ambiental. Com isto, pretende-se analisar de maneira integrada os aspectos físico-ambientais, que implicam na fragilidade potencial dos meios naturais e antropizados, e classificá-los, conforme os graus de estabilidade/vulnerabilidade morfodinâmica da paisagem.

2. Caracterização da área de estudo

A área de estudo em questão trata-se da Sub-bacia do Rio Bodó (Figura 1), que está localizada no estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil, entre os municípios Santana do Matos, Bodó, Lagoa Nova e Cerro Corá, na microrregião da Serra de Santana. Seus principais afluentes são os riachos do Piató, do Diogo, da Onça, Carnaúba e de Maria Francisca (ao norte); o rio da Cafuca e o riacho Dois Rios (ao sul); o rio Poço dos Cavalos (a leste); o rio da Cafuca, o riacho do Curralinho e a Grota da Ferveadeira (a oeste). Todos esses cursos d'água têm regime intermitente e o padrão de drenagem dendrítico (CPRM, 2005). De acordo com a nova divisão do IBGE (2017) a área estudada está inserida entre os limites das regiões imediatas de Currais Novos e Açu, respectivamente, nas regiões intermediárias de Caicó e Mossoró.



*Figura 1 – Mapa de Localização da Sub-bacia do Rio Bodó, RN.
Fonte: IBGE (2020); Open Street Map. Elaboração: autores (2022).*

Em termos regionais, a Sub-bacia do Rio Bodó está inserida nos domínios da bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu. Sua área de extensão da bacia é de 665,9 km², seu perímetro é de 258,659 e o KC da bacia é 2,81, o que pressupõe que esta bacia não é sujeita a grandes processos hidrológicos de enchentes e inundações. O relevo da área de estudo é caracterizado pelas seguintes unidades geomorfológicas: Serras de Santana e Cuité; Depressão Sertaneja Setentrional; Encostas Orientais do Planalto da Borborema e Serras Ocidentais do Planalto da Borborema (IBGE, 2023). A altitude média da bacia varia de 63 a 723 metros, e as declividades variam de 0 a 55° (SRTM, 2000).

Embasando o relevo, a geologia da área de estudo é constituída pelos litotipos do Complexo Caicó; rochas do Grupo Seridó, representado pelas formações Seridó e Jucurutu; pelos granitóides das suítes Poço da Cruz, Itaporanga e

Granitóides indiscriminados brasileiros; pelos sedimentos da Formação Serra dos Martins, bem como, Depósitos aluvionares; Depósitos aluvionares antigos e pela suíte intrusiva São João do Sabugi (CPRM, 2019). As classes de solos encontrados nessa referida área, são: LAd - Latossolo Amarelo Distrófico; RLe - Neossolo Litólico Eutrófico; SNo - Planossolo Nátrico Órtico e TCo - Luvisso Crômico Órtico (IBGE, 2023). Por fim, o clima da região é característico de áreas de Brejos Úmidos de Altitude, ocorrendo o clima Aw' (tropical quente e úmido, com chuvas de verão-outono e inverno seco) segundo a classificação de Köppen, com média pluviométrica anual de 800 mm. (FARIAS, 2016).

3. Metodologia

3.1. Etapas do mapeamento

Para o mapeamento da vulnerabilidade ambiental potencial, foram subdivididas as seguintes etapas: I) confecção de mapas das variáveis potenciais à vulnerabilidade; II) ponderação dos fatores, em que as situações em que há o predomínio da pedogênese recebem valores próximos a 1, passando por situações intermediárias (às quais se atribuem valores próximos a 2) e situações de predomínio dos processos de morfogênese (às quais se atribuem os valores próximos a 3); III) análise multicritério e álgebra de mapas.

Para a composição da base cartográfica para confecção dos mapas, foram utilizados o Modelo Digital de Elevação (MDE), oriundo da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30m, e cenas do Satélite Sentinel-2, datado de 12 de out. de 2021. As cenas e o MDE foram adquiridas da *United States Geological Survey* (USGS). Para composição da base cartográfica vetorial foram utilizados os arquivos vetoriais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - (IBGE), do Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil (PRONASSOLOS) e os arquivos vetoriais geológicos das cartas geológicas-geofísicas da CPRM, na escala de 1:100.000.

No que tange à delimitação da bacia, utilizou-se o MDE de 30 m do SRTM, que teve as depressões preenchidas a partir da ferramenta “*r.fill.dir*”, sendo necessária a extração de meias-bacias, direção de fluxo e drenagens, a partir do uso da ferramenta “*r.watershed*”. Após essa etapa, a bacia foi delimitada a partir do ponto de exutório, utilizando-se a ferramenta “*r.water.outlet*”. A ferramenta “*water.outlet*” gera uma bacia hidrográfica a partir de um mapa de direção de drenagem e um conjunto de coordenadas, que representa o ponto de saída da bacia que é o exutório (QGIS, 2022).

Após a delimitação da bacia, o arquivo raster gerado foi convertido em arquivo vetorial, no qual foram extraídos os cálculos de geometria da bacia, tais como a área, perímetro e o Coeficiente de Compacidade (Kc), que foi calculado a partir da Equação 1, utilizando-se os valores de área e perímetro.

$$Kc = 0,28 \cdot \frac{A}{P} \quad (1)$$

Em que Kc é o coeficiente de compacidade (adimensional); P o perímetro da bacia (m); e A área de drenagem (m²).

A priori, as variáveis morfométricas da declividade e geomorfologia (Índice de Dissecação do Relevo) foram combinadas, com vistas a gerar o fator vulnerabilidade para a geomorfologia. Em seguida, este fator morfométrico da bacia foi combinado aos fatores físico-ambientais, tais como: Pedologia, Vegetação, Geologia e Clima. Esse mapeamento foi adaptado conforme metodologias utilizadas por Crepani *et al.* (2001) e Ross (1994), que derivam do conceito de Ecodinâmica de Tricart (1977). Crepani (2001), por sua vez, utilizou as variáveis do índice de dissecação do relevo, rocha, solo e cobertura vegetal e estabeleceu igual importância para as variáveis ambientais no estudo da vulnerabilidade ambiental para o zoneamento ecológico-econômico.

Para gerar o mapa de declividade foi utilizado o MDE de 30 m do SRTM, que teve as depressões preenchidas a partir da ferramenta “*r.fill.dir*” do *software* Qgis 3.22. A partir do MDE previamente tratado, foi extraída a declividade da bacia utilizando a ferramenta “*declive*”. Após essa etapa, o raster foi reclassificado conforme os intervalos de declividade preconizados por Ross (1994).

Para o mapa de Índice de Dissecação do Relevo (IDR) foi utilizada a metodologia de Ross (1994) e de Guimarães *et al.* (2017), onde este último subdividiu esse mapeamento em quatro etapas principais: o tratamento do modelo digital de elevação, o mapeamento do grau de entalhamento dos vales, o mapeamento da dimensão interfluvial média para cada bacia e a integração destes dois últimos produtos. Para esta pesquisa foram adotados os mesmos procedimentos metodológicos descritos por Guimarães *et al.* (2017) para automatização do IDR, porém, ressalta-se que diferente da referida pesquisa, as etapas de processamento foram realizadas utilizando-se o *software* Qgis 3.22 com o MDE de 30 m. Deste modo, os procedimentos para a geração do IDR consistiram nas seguintes etapas: I) tratamento e preparação do MDE, utilizando-se a ferramenta “*r.fill.dir*”; II) geração de um MDE invertido; III) geração das meias-bacias e da direção de fluxo, a partir da

ferramenta “watershed”; IV) vetorização das meias-bacias; V) aplicação das estatísticas ao arquivo vetorizado a partir do uso da ferramenta “estatísticas zonais” VI) cálculo de geometrias, dissecação vertical e horizontal na tabela de atributos, posteriormente, cálculo do índice de dissecação do relevo; VII) rasterização do arquivo vetorial e classificação das classes de dissecação.

Para a classificação dos intervalos do arquivo raster gerado foi utilizada a proposta de classificação 3 de Guimarães et al. (2017), na qual, os intervalos foram divididos em: muito fraca, fraca, moderada, alta e muito alta dissecação do relevo. Na confecção das demais variáveis, foram utilizados os dados vetoriais de solos, vegetação e geologia, sendo esta última, a partir do mosaico das Cartas geológicas-geofísicas da CPRM, utilizando as Folhas Açú, Lajes, Currais Novos e Santa Cruz.

3.2. Análise multicritério e álgebra de mapas

Para o diagnóstico da vulnerabilidade ambiental foram considerados os graus de fragilidade e instabilidade que resultam do produto gerado da combinação de todos os fatores, conforme é observado em metodologias preexistentes, como as de Nicolau (2018); Tavares, Romão e Oliveira (2020) e Crepani et al. (2001), que baseando-se em princípios preconizados por Tricart (1977), estabeleceram a avaliação conforme a estabilidade das categorias morfodinâmicas.

Nesse sentido, utilizou-se a metodologia de Crepani et al (2001) na qual os fatores receberam os pesos conforme as categorias morfodinâmicas de cada fator analisado, deste modo, quando há prevalência da pedogênese pressupõe a estabilidade dos fatores; quando há prevalência da morfogênese, pressupõe que as variáveis apresentam instabilidade, como pode ser observado na Tabela 1. Desse modo, esta etapa foi dividida em: ponderação dos planos de informações dos vetores; reclassificação dos rasters conforme os pesos atribuídos; conversão dos vetores ponderados em raster; combinação dos fatores na calculadora raster do Qgis 3.22 e, por último, a classificação dos valores de vulnerabilidade nas propriedades do arquivo raster.

Tabela 1 – Categorias morfodinâmicas para os valores de vulnerabilidade.

Categoria morfodinâmica	Relação Pedo/Morfogênese	Valor
Estável	Prevalece a Pedogênese	1,0
Intermediária	Equilíbrio Pedogênese/Morfogênese	2,0
Instável	Prevalece a Morfogênese	3,0

Fonte: Adaptado de Crepani et al (2001). Elaboração: autores (2022).

Por sua vez, a escala de vulnerabilidade das unidades territoriais básicas, preconizado por Crepani et al (2001) é feita segundo critérios desenvolvidos a partir dos princípios da Ecodinâmica de Tricart (1977) que estabelece as seguintes categorias morfodinâmicas (Tabela 2). A partir desses parâmetros, fez-se possível realizar a ponderação dos fatores, considerando o estágio de evolução morfodinâmica e a vulnerabilidade atribuída a cada fator, aplicando os pesos individualmente aos temas Geomorfologia (IDR e Declividade), Geologia, Solos e Vegetação.

Tabela 2 – Categorias morfodinâmicas de vulnerabilidade com base em Tricart (1977).

Meios Estáveis	Meios intergrades	Meios fortemente instáveis
Cobertura vegetal densa; dissecação moderada; e ausência de manifestações vulcânicas.	Balço entre as interferências morfogenéticas e pedogenéticas.	Condições bioclimáticas agressivas; relevo com vigorosa dissecação; presença de solos rasos; inexistência de cobertura vegetal densa; planícies e fundos de vales sujeitos a inundações; e geodinâmica interna intensa.

Fonte: Adaptado de Crepani et al (2001). Elaboração: autores (2022).

Para a ponderação dos fatores morfométricos utilizou-se o padrão preconizado por Ross (1994), Becker e Egler (1996);

Crepani et al. (2001) e Nicolau (2018), os quais propuseram que os valores próximos de 1,0 da escala de vulnerabilidade estão associados a pequenos ângulos de inclinação das encostas, situação em que prevalecem os processos formadores de solo da pedogênese. Entretanto, valores mais próximos de 3,0 estão associados a situações de maior declividade, relevos fortemente ondulados a escarpados ou dissecados em cristas, onde prevalecem os processos erosivos da morfogênese (Tabela 3).

Tabela 3 – Vulnerabilidade para as classes de declividade.

Classes morfométricas	Declividade (%)	Vulnerabilidade
Muito Baixa	< 6	1,0
Baixa	6 – 12	1,5
Média	12 – 20	2,0
Alta	20 - 30	2,5
Muito Alta	> 30	3,0

Fonte: Adaptado de Ross (1994) e Crepani et al (2001). **Elaboração:** autores (2022).

Para Ross (1994) os critérios utilizados para a variável Pedologia passa pelas características de textura, estrutura, plasticidade, grau de coesão das partículas e profundidade/espessura dos horizontes superficiais e subsuperficiais. Portanto, estão diretamente relacionadas com o relevo, a litologia, o clima, elementos motores da pedogênese e fatores determinantes das características físicas e químicas dos solos. Deste modo, quanto mais desenvolvido forem as classes de solos, porosos, bem drenados e profundos, menor será sua vulnerabilidade e logo receberá pesos em função de sua estabilidade. Quanto menos desenvolvidos forem, ou seja, rasos, jovens e susceptíveis à erosão, prevalecendo a morfogênese, logo receberá valores conforme os graus de sua instabilidade (Tabela 4).

Tabela 4 - Valores de Vulnerabilidade/Estabilidade para a variável Pedologia.

Classes de solo	Legenda	Vuln./ estab.
Latossolo Amarelo Distrófico	LAd	1,0
Planossolo Nátrico Órtico	SNo	2,0
Luvissolo Crômico Órtico	TCo	2,0
Neossolo Litólico Eutrófico	RLe	3,0

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001). **Elaboração:** autores (2022).

Do mesmo modo, para os demais fatores foram considerados os critérios de instabilidade para cada variável, atribuindo-se pesos relativos à vulnerabilidade/estabilidade e, posteriormente, convertendo-se cada tema do formato *shapefile* para arquivo em formato raster.

Posteriormente, na calculadora raster do Qgis 3.22 foi realizada a álgebra dos mapas, que corresponde a combinação das variáveis analisadas, resultando assim no mapa de vulnerabilidade da paisagem, a partir de uma equação empírica (Equação 2):

$$V = \left(\frac{G+R+S+Vg+C}{5} \right) \quad (2)$$

Onde *V* é a vulnerabilidade; *G* a vulnerabilidade para o tema Geologia; *R* a vulnerabilidade para o tema Geomorfologia; *S* a vulnerabilidade para o tema solos; *Vg* é a vulnerabilidade para o tema vegetação; *C* a vulnerabilidade para o tema clima.

Em seguida, o raster gerado foi recodificado para então extrair-se as áreas de cada classe utilizando a ferramenta “r.report” do Qgis 3.22. Por fim, as informações de área em km² foram exportadas para uma tabela do Excel com vistas a quantificar a porcentagem para cada classe de vulnerabilidade atribuída para a Sub-bacia do Rio Bodó.

4. Resultados e discussão

Para esta pesquisa foram elaborados mapas-bases para a composição da álgebra de mapas. Dentre esses mapas destaca-se as variáveis morfométricas do relevo, que correspondem ao fator geomorfológico, sendo estes: Declividade e Índice de Dissecação do Relevo (ROSS, 1994).

A declividade é uma importante variável morfométrica do relevo a ser utilizada nas análises de vulnerabilidade do terreno, pois quanto maior a declividade do terreno, maior a velocidade e capacidade de transporte das águas pluviais, contribuindo para o processo erosivo do solo (LIRA; FRANCISCO; FEIDEN, 2022). Para Ross (1994) as análises de fragilidade do relevo que envolvem escalas médias ou pequenas devem utilizar como base os padrões de forma com a rugosidade topográfica ou a Matriz dos Índice de Dissecação do Relevo, tendo em vista que a dissecação do relevo é maior em áreas onde predominam vales encaixados e profundos, em forma de V, com dimensão interfluvial pequena, caracterizados por apresentarem altas declividades (GUIMARÃES *et al.*, 2017).

Considerando esses pressupostos, o primeiro mapa de Declividade (Figura 2) apresenta seis classes de declive para a Sub-bacia do Rio Bodó. Observa-se que predominam declives suaves a ondulados (entre 0 a 12) nas áreas no entorno do exutório e também na parte sul-sudoeste da bacia, onde está localizada parte do platô da Serra de Santana. As declividades mais acentuadas correspondem às escarpas erosivas da serra de Santana e Inselbergues das unidades geomorfológicas Serras Ocidentais do Planalto da Borborema, que apresentam morfologia dissecada. Essas declividades são encontradas no meio e na parte inferior da bacia (sul-sudeste) do Mapa de Declividade, correspondendo a cerca de 23,13% da bacia. As declividades suaves e suave ondulado corresponderam a 76,9% do total da área estudada.

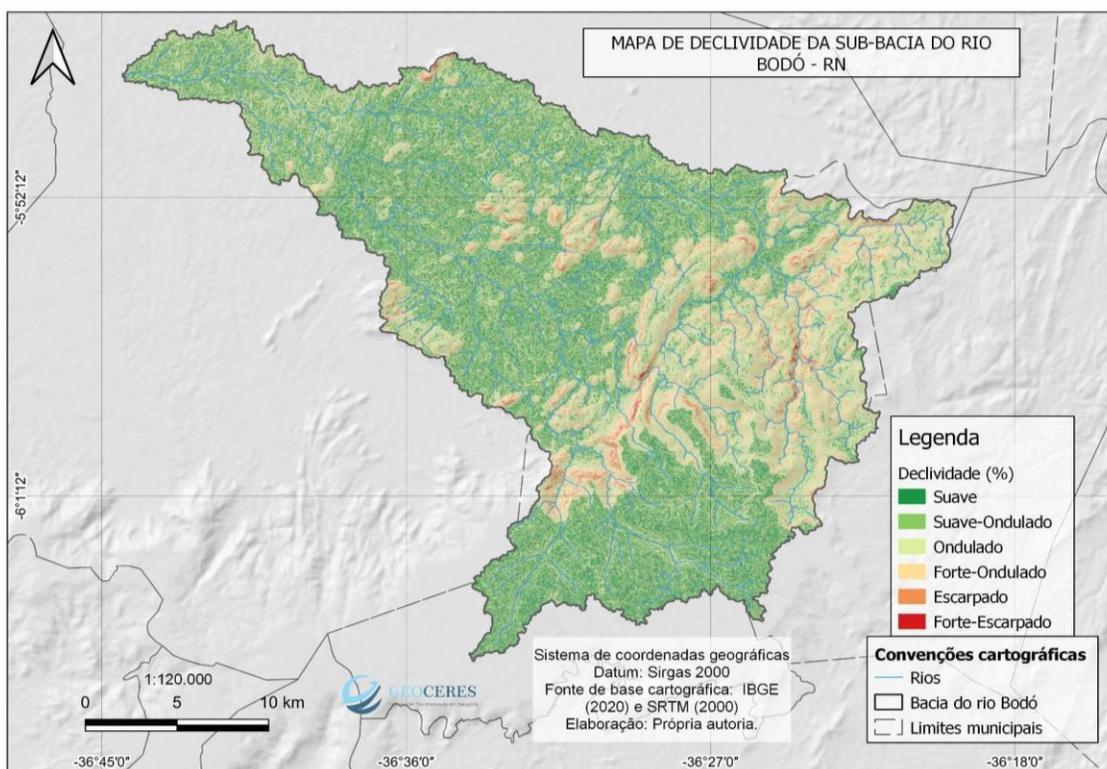


Figura 2 - Mapa de Declividade da Sub-bacia do Rio Bodó, RN.
 Fonte: SRTM (2000); IBGE (2022). Elaboração: autores (2023).

O Mapa de índice de Dissecação do Relevo (IDR), por sua vez, apresentou quatro classes de dissecação para a área de

estudo, sendo elas: fraca, moderada, forte e muito forte índice. É importante destacar que a matriz de dissecação do relevo apresenta valores muito altos para as áreas com vales em “V”, extremamente encaixados e declivosos, comuns em ambientes de alta energia e elevado gradiente altimétrico. De acordo com Crepani *et al.* (2001) quanto maiores forem os interflúvios (ou menor for a intensidade de dissecação) menores são os valores atribuídos às unidades de paisagem natural na escala de vulnerabilidade; da mesma forma as unidades de paisagem natural que apresentem os menores interflúvios (ou maiores intensidades de dissecação) recebem valores da escala de vulnerabilidade maiores, tendo em vista que predominam, de maneira geral, os processos de morfogênese em detrimento da pedogênese.

Para esta pesquisa a matriz de dissecação do relevo apresentou valores variando entre 14 e 55 que, de acordo com a proposta de automatização do IDR, conforme Guimarães *et al.* (2017), correspondem respectivamente às classes baixa e muito alta dissecação. Desse modo, as áreas da bacia com dissecação muito alta e alta dissecação corresponderam a 33,4% do total; as áreas com dissecação moderada corresponderam a cerca de 0,6% e as áreas com dissecação baixa corresponderam a 66% da área total da bacia. Ressalta-se que as classes de alta e muito alta dissecação foram obtidas nas áreas escarpadas da bacia, que apresentam vales encaixados, bastante dissecados e uma correspondente amplitude altimétrica elevada (acima de 600 m). Enquanto que a classe de dissecação fraca correspondeu às áreas com topos planos e fraca declividade (Figura 3), relacionadas à serra de Santana e sua cobertura lateríticas planificada no topo.

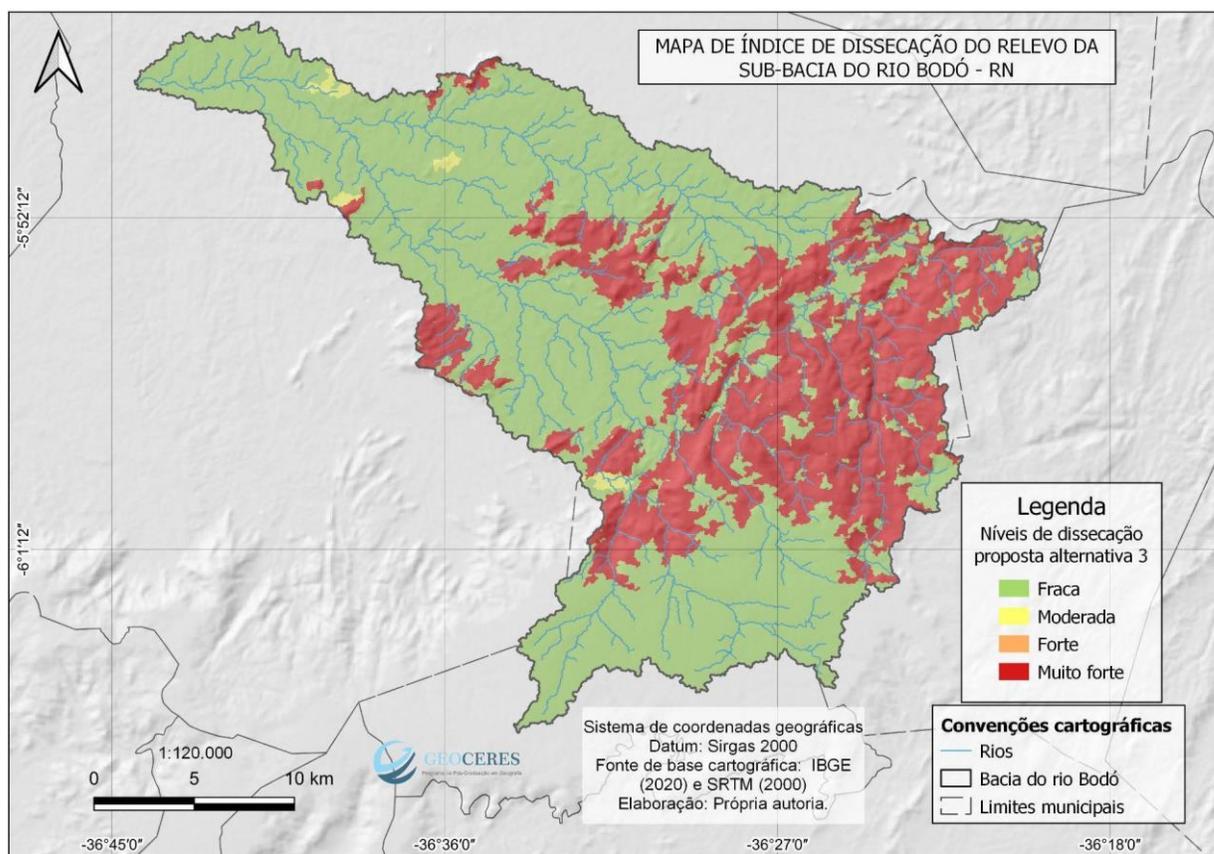


Figura 3 - Mapa de Índice de Dissecação do Relevo – IDR.

Fonte: Ross (1994), adaptado de Guimarães *et al* (2017). Elaboração: autores, 2023.

Para as demais variáveis que compuseram essa análise, levou-se em consideração os graus de vulnerabilidade de cada fator em relação às categorias morfodinâmicas de estabilidade do relevo (TRICART, 1977).

A vegetação é uma importante variável a ser aplicada aos estudos de vulnerabilidade ambiental, tendo em vista que a densidade da cobertura vegetal constitui-se como fator protetivo das encostas e do solo aos processos erosivos, sobretudo, pela capacidade de interceptação da precipitação pelas copas das árvores, reduzindo a capacidade da ação do “splash” e consequente ruptura dos agregados. Desse modo, as áreas com densidade de espécies vegetais nativas e de porte mais

arbóreo, recebem peso 1,0, tendo em vista o fator protetivo da cobertura vegetal sobre o solo. Porém, as áreas ocupadas por atividades agrícolas, agropecuárias e áreas urbanizadas recebem pesos maiores, tendo em vista que o solo desnudo apresenta maior suscetibilidade aos processos erosivos, e as atividades como a agropecuária propiciam a compactação do solo e consequente suscetibilidade aos processos de erosão pluvial, que acarretam a perda do solo e acentuam os processos de desertificação nessas áreas.

Quanto às classes de vegetação encontradas, a classe Savana-Estépica Arborizada (68,1%) recebeu os menores pesos, tendo em vista a estabilidade conferida pela vegetação em relação aos processos morfogenéticos. Entretanto, as classes Agricultura com Culturas Permanentes (14,0%), Agropecuária (14,7%) e Influência urbana (0,4%) apresentaram maiores pesos em função do uso de suas potencialidades e antropização da área, o que acarreta em desmatamentos, acentuação dos processos erosivos, degradação ambiental e escassez dos recursos hídricos. Para a cobertura vegetal considerada moderadamente vulnerável reservou-se os valores situados entre 2,3 e 2,6 na escala de vulnerabilidade, destacando-se a classe de vegetação Savana-Estépica Parque, como é ponderada na metodologia de Crepani *et al.* (2001).

É importante ressaltar o papel da vegetação para as análises de vulnerabilidade ambiental da paisagem, pois compete à vegetação o papel de retardar o ingresso das águas, provenientes das precipitações, nas correntes de drenagem, pelo aumento da capacidade de infiltração do solo (FLORENZANO, 2008). Deste modo, a cobertura vegetal está, portanto, diretamente ligada à capacidade de proteção do solo aos processos erosivos, bem como, a cobertura vegetal mais densa permite o desenvolvimento da pedogênese, propiciando o desenvolvimento e a maturidade dos solos.

Para a área de estudo foram identificadas seis classes de vegetação (Figura 4) na área de estudo conforme IBGE (2021), sendo elas: Corpo de Água continental, Savana Estépica Arborizada, Savana Estépica Parque, Agriculturas com Culturas Permanentes, Agropecuária e Influência Urbana.

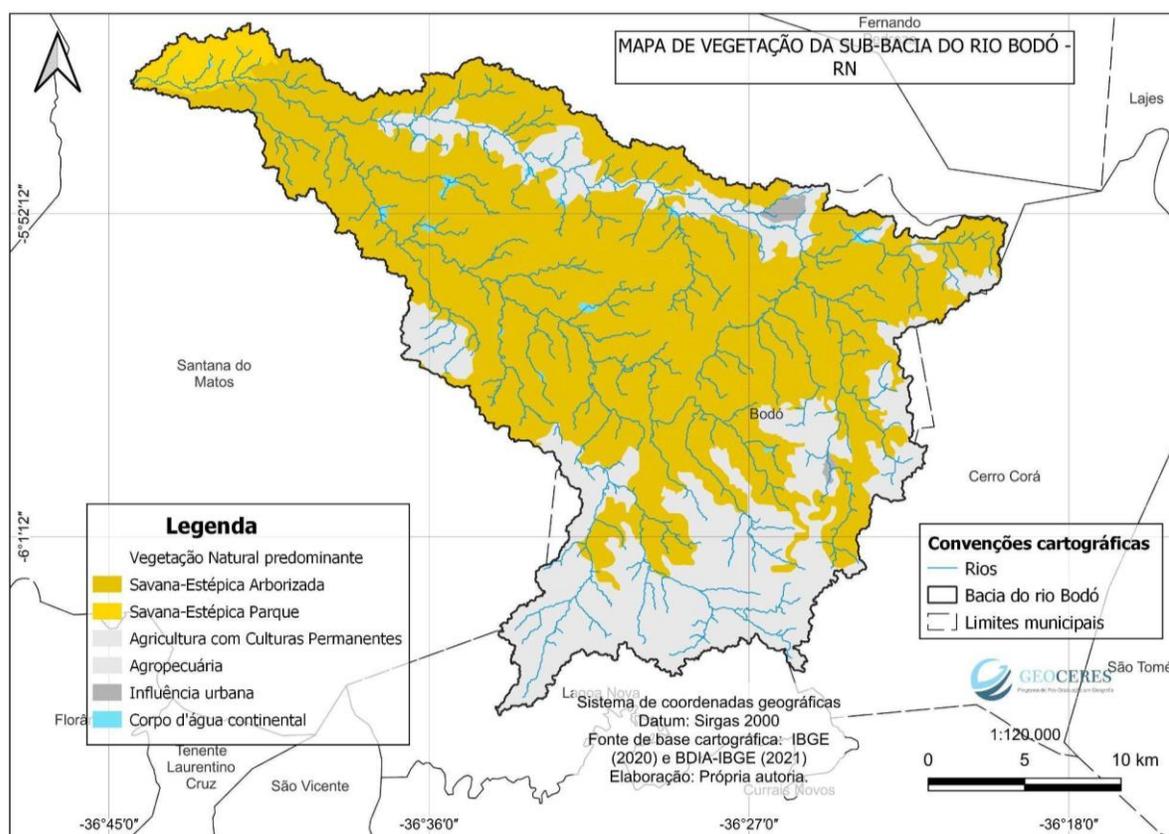


Figura 4 - Mapa de Vegetação da área de estudo.
 Fonte: IBGE (2021); IBGE (2021). Elaboração: autores, 2023.

A classe de vegetação que se sobressai com maior extensão territorial é a Savana Estépica Arborizada com cerca de

453,65 km²; Agricultura com Culturas Permanentes, com cerca de 93,17 km²; Agropecuária com 97,7 km² e Savana-Estéptica Parque com área de 15,6 km². As classes que receberam maiores pesos em função de sua instabilidade morfodinâmica foram: Agropecuária e influência Urbana. Já as classes consideradas moderadamente instáveis ou intergrades, foram: Savana Estéptica Parque e Agriculturas com Culturas Permanentes, devido a antropização da vegetação nativa para dar espaço a culturas permanentes. As classes consideradas estáveis, que receberam menores pesos em função da prevalência da pedogênese sobre a morfogênese, foram: Savana Estéptica Arborizada e Corpo de Água continental.

Para a variável solo (Figura 5), destaca-se que as classes de solos encontradas na área de estudo, são: LAd - Latossolo Amarelo Distrófico (18%); RLe - Neossolo Litólico Eutrófico (33,5%); SNo - Planossolo Nátrico Órtico (33,2%) e TCo - Luvisolo Crômico Órtico (15,3%).

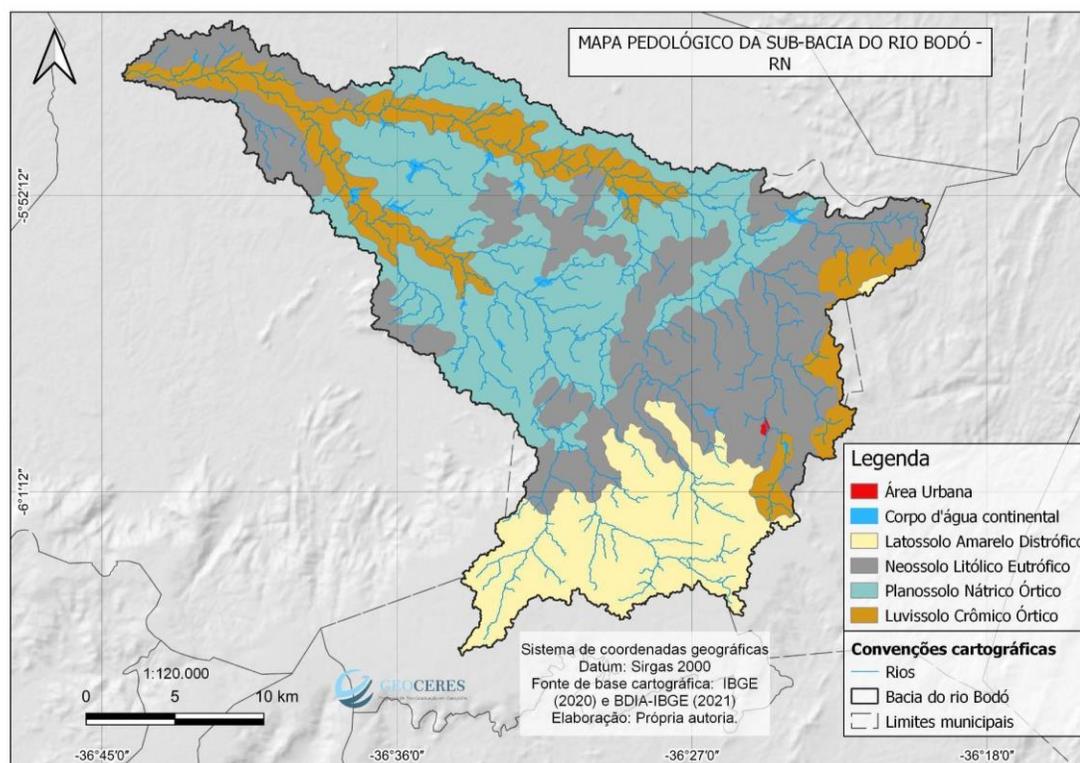


Figura 5 - Mapa Pedológico da sub-bacia do Rio Bodó, RN.
Fonte: Adaptado de IBGE (2021). Elaboração: autores, 2023.

Os Latossolos são encontrados predominante em relevos planos, no platô da serra de Santana, que está localizada na porção sul-sudeste da sub-bacia e que apresentam classes de vulnerabilidade classificada como estável, pois, de maneira geral, predomina a pedogênese em detrimento da morfogênese. De acordo Tavares, Romão e Oliveira (2020) os Latossolos são solos bem desenvolvidos, profundos e bem estruturados, com predomínio de agregações, sendo considerados solos mais maduros, cuja porosidade é alta. Além disso, essa classe de solo encontra-se em relevo plano, embora o uso predatório desse recurso pedológico para as práticas agropecuárias e ocupação antrópica possa acarretar na sua degradação e acentuar os processos erosivos no terreno.

A classe Neossolo Litólico Eutrófico, por sua vez, caracteriza-se por ser uma classe de solos jovens e arenosos e de baixa capacidade de retenção de água, sendo interpretados como muito vulneráveis à erosão e com baixa aptidão agrícola (TAVARES, ROMÃO; OLIVEIRA, 2020). Deste modo, essa classe de solo apresentou maior instabilidade, principalmente, levando em consideração que ocorrem geralmente nas encostas escarpadas de elevado percentual de declividade, ocorrendo o predomínio da morfogênese, prevalecendo os processos erosivos nessa área da sub-bacia.

Conforme explicam Saraiva *et al.* (2021) os Planossolos Nátricos em ambiente semiárido possuem contrastante diferenciação entre os horizontes superficiais e subsuperficiais (B plânico). Na superfície os horizontes são mais arenosos e permeáveis, os quais mudam abruptamente para um horizonte compactado e mais argiloso com permeabilidade muito

restrita, constituindo por vezes um horizonte que é responsável pela detenção do lençol d'água suspenso. Por isso, essa classe de solo apresenta vulnerabilidade intermediária, tendo em vista que a diferenciação abrupta dos horizontes e sua textura fragmentária arenosa e pedregosa pode torná-la suscetível aos processos erosivos, principalmente em um contexto onde se tem o manejo inadequado desse recurso pedológico. Do mesmo modo, as classes dos Luvisolos Crômicos receberam pesos intermediários em relação à sua estabilidade morfodinâmica, pois apresentam mudança textural abrupta dos horizontes e, geralmente, são solos rasos de textura média/argilosa e pedregosa, estando suscetíveis a processos de erosão laminar, principalmente considerando que os mesmos encontram-se nas planícies aluvionares sujeitas a inundações.

Para o fator Geologia (Figura 6) considera-se para a análise da categoria morfodinâmica as informações relativas à história da evolução geológica do ambiente e o grau de coesão das rochas que a compõem (FLORENZANO, 2008). O grau de coesão das rochas é a informação básica da geologia a ser integrada a partir da Ecodinâmica, uma vez que as rochas pouco coesas prevalecem os processos modificadores do relevo sustentado por essas litologias. Desse modo, para a presente pesquisa, considerou-se que as classes de rochas ígneas são mais estáveis em relação à vulnerabilidade da paisagem, pois apresentam maior resistência ao intemperismo dos minerais, como ponderou Crepani et al. (2001).

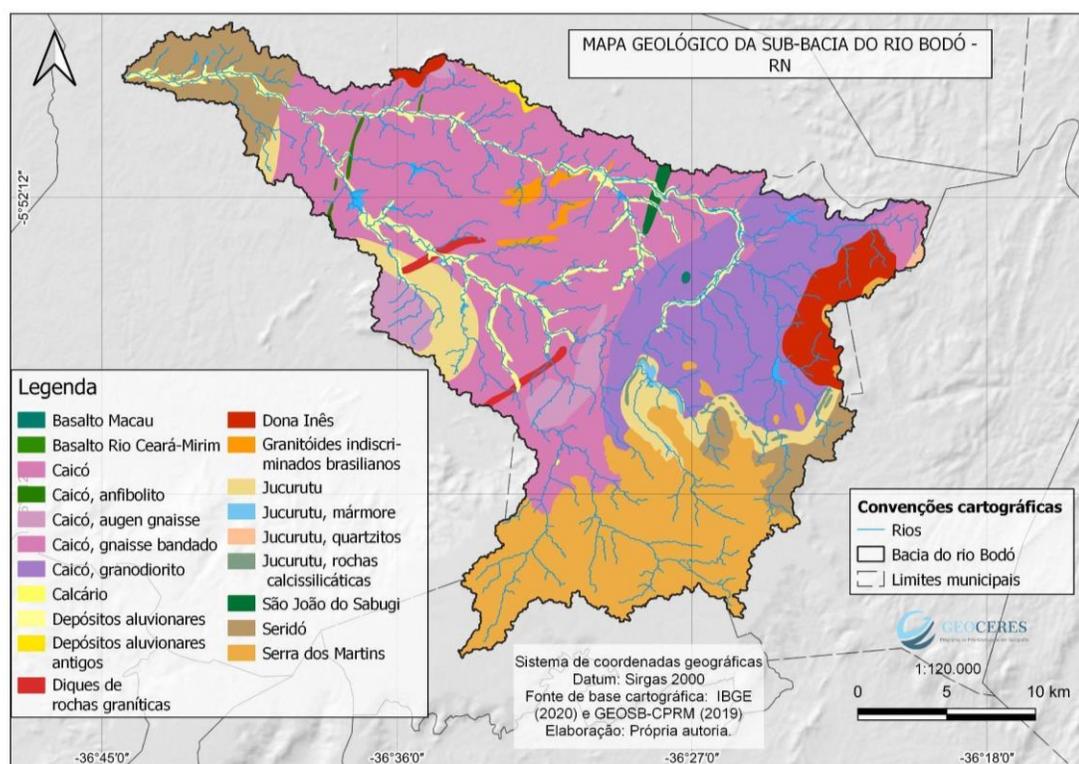


Figura 6 - Mapa de unidades geológicas da área de estudo.

Fonte - CPRM (2019). Elaboração: autores, 2023.

As rochas metamórficas, por sua vez, apresentaram estabilidade moderada para a sub-bacia, tendo em vista que prevalecem na área de estudo rochas resistentes aos processos de intemperismo, como os quartzitos e gnaisses; e outras com menor resistência, como o mármore e os granulitos. Deve-se destacar que as diferenças litológicas entre essas unidades acentuam processos de instabilidade do relevo, por vezes, em função de rupturas topográficas e altimétricas, como a ocorrência de diáclases, planos de fraqueza associados com fraturas e lineamentos, além da formação de matacões e blocos nas encostas com alto percentual de declividade, o que pode acarretar em processos erosivos severos e movimentos de massa.

Quanto às rochas sedimentares e depósitos correlatos, de maneira geral é considerado a escala do recorte espacial da pesquisa, estas receberam maiores pesos, destacando-se os cascalhos, argilas e demais materiais inconsolidados verificados em depósitos recentes, além de conglomerados polimíticos e os arenitos, que ocorrem principalmente nas planícies aluvionares cenozóicas de composição clástica e sedimentar inconsolidada, pois embora as rochas sedimentares clásticas

apresentem estabilidade assegurada pela diagênese dos materiais majoritariamente homogêneos que as compõem, fundamentais para sua resistência aos processos de intemperismo e erosão, o mesmo não pode ser garantido com relação ao agregado que elas formam e muitas delas são friáveis ou fisséis (CREPANI *et al.*, 2001).

O Clima, por sua vez, é uma importante variável a ser considerada nas análises de vulnerabilidade ambiental, sobretudo, a variável pluviometria que interfere diretamente na capacidade de erodibilidade hídrica de uma determinada área. Para a área de estudo em questão, o Mapa de Pluviometria (Figura 7) apresenta intervalos de precipitação que variam de 752 a 882 mm, distribuídos em quatro intervalos que variam de 752 a 782 mm; 782 a 797 mm; 797 a 818 mm e 818 a 882 mm.

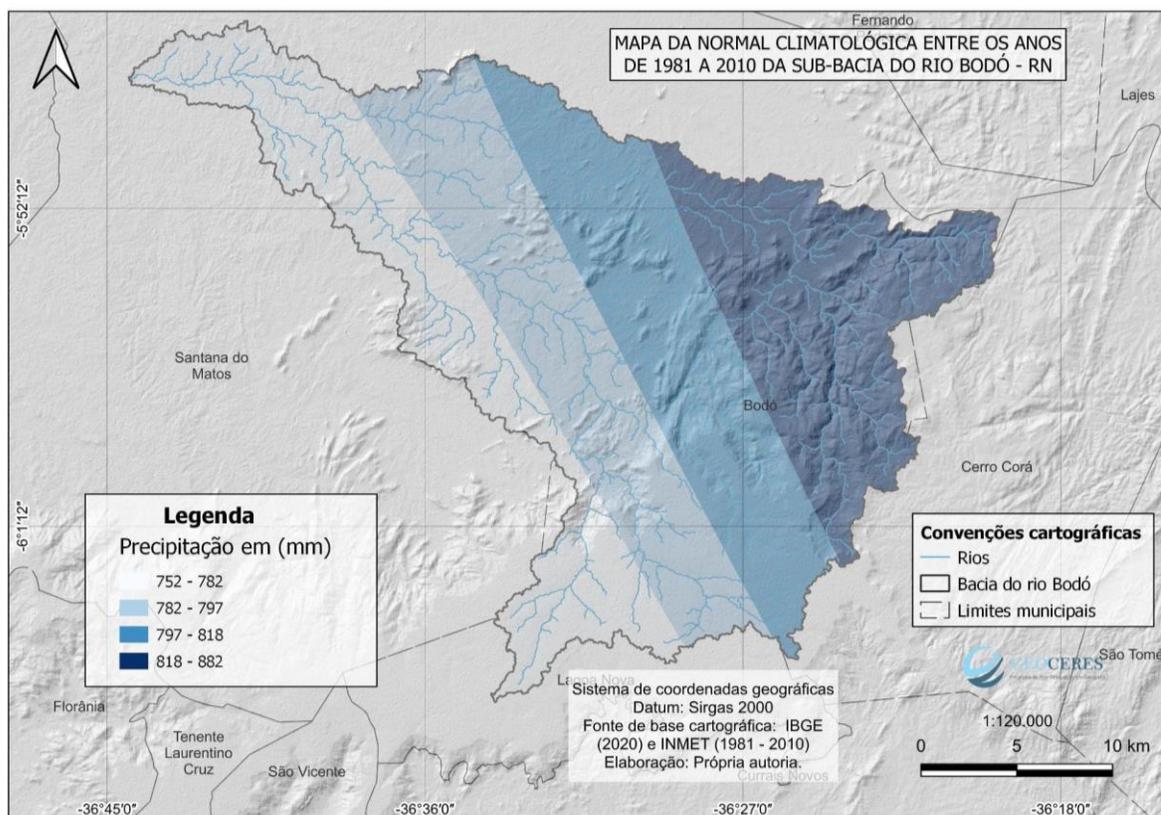


Figura 7 - Mapa de Pluviometria
Fonte: IBGE (2020); INMET (1981-2010). Elaboração: autores, 2023.

Observa-se no referido mapa que as áreas de maior densidade pluviométrica correspondem aos terrenos mais dissecados, ou seja, o gradiente vertical de temperatura e a umidade das vertentes a barlavento influenciam diretamente no quantitativo de precipitação que a área recebe e, por conseguinte, também no clima. Além disso, as vertentes orientadas para as direções norte e leste recebem maior umidade do que as vertentes opostas, que estão localizadas à sotavento. Todavia, deve-se ressaltar que a área da sub-bacia está inserida numa região semiárida, embora as áreas mais dissecadas e de altitude possuam características díspares do seu entorno, principalmente, nos intervalos hipsométricos entre 680 e 740 m, o que lhes confere uma pequena diminuição nas taxas médias de temperatura e evapotranspiração e um acréscimo de precipitação e neblina em relação ao seu entorno (MEDEIROS, 2019).

Para a análise de vulnerabilidade a partir da variável pluviometria foi considerado o que preconizam Crepani *et al.* (2001) no que tange à capacidade da erodibilidade hídrica, a partir da intensidade pluviométrica, tendo em vista que áreas com maiores índices pluviométricos recebem pesos maiores, pois quanto maiores os valores da intensidade pluviométrica maior é a erosividade da chuva. Desse modo, os valores de 818 a 882 mm receberam pesos 3,0, principalmente levando em consideração que esses índices pluviométricos ocorrem predominantemente nas áreas úmidas das vertentes a barlavento da bacia, onde ocorre naturalmente um maior percentual de umidade do que o seu entorno. Por outro lado, as áreas com menores índices de precipitação receberam menores pesos.

Todos esses fatores combinados resultaram na Carta de Vulnerabilidade Ambiental aplicada à sub-bacia do Rio Bodó, no estado do RN (Figura 8), que apresentou para essa análise cinco classes de vulnerabilidade distribuídas para a área da referida bacia: muito fraca, fraca, moderada, forte e muito forte vulnerabilidade.

Analisando o referido mapa, é perceptível que as classes muito fraca e fraca vulnerabilidade são distribuídas, sobretudo, nas áreas de ocorrência de relevo plano a suave ondulado, com baixa dissecação do relevo, bem como onde ocorrem os reservatórios hídricos, isso devido o fator de proteção das faixas marginais dos rios e da influência da vegetação ciliar. Do mesmo modo, coincide com terrenos ocupados por classes de solos mais estáveis, como os Latossolos Amarelos Distróficos e áreas de cobertura vegetal preservadas.

Para a classe de vulnerabilidade moderada, observou-se que ocorrem nas áreas limítrofes entre as classes estáveis e instáveis da Sub-bacia, o que configura-se exatamente em um ambiente medianamente estável/vulnerável. Na escala adotada correspondem a terrenos que apresentam relevo ondulado a forte ondulado; áreas geologicamente instáveis (sedimentares); classes de solo medianamente estáveis/vulneráveis, tais como os Luvisolos e Neossolos, e áreas antropizadas, como as ocupadas para práticas agropecuárias.

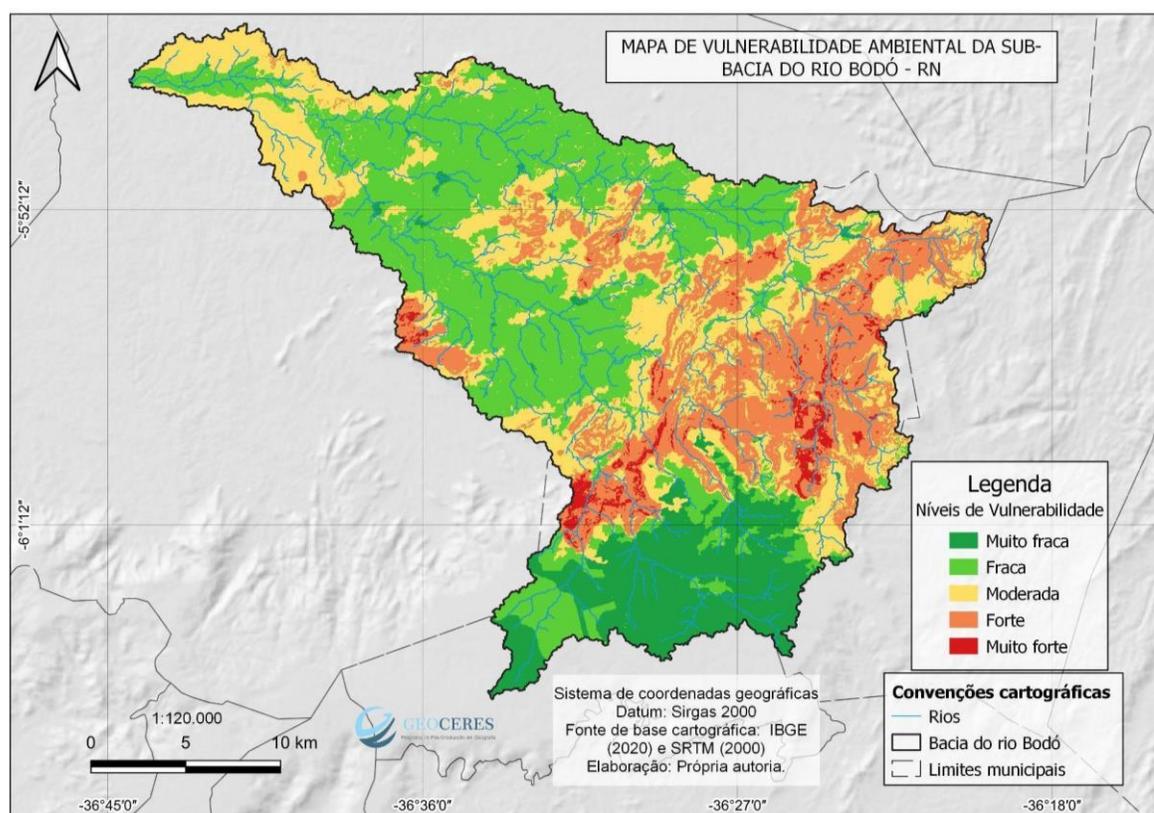


Figura 8 - Carta de Vulnerabilidade Ambiental aplicada para a sub-bacia do Rio Bodó, RN.

Fonte: IBGE (2020); SRTM (2000); dados dos mapas previamente elaborados. Elaboração: autores, 2023.

Quanto às classes alta e muito alta vulnerabilidade, por sua vez, observou-se que estão distribuídas nas áreas de relevo escarpado, fortemente dissecado, onde ocorrem as classes de solos jovens e pouco desenvolvidos, como a classe Neossolo Litólico. Nessas áreas observa-se uma intensa rugosidade, onde também prevalecem os maiores índices de umidade e pluviometria, devido o gradiente vertical de temperatura e aspectos morfométricos, como a orientação das vertentes. Nessa classe, o predomínio da morfogênese sobre a pedogênese é acentuado, estando fortemente suscetíveis aos processos formadores do relevo, à ação do intemperismo e aos processos erosivos e movimentos de massa em vertentes de declividade acentuada. Do mesmo modo, ademais, coincide com áreas ocupadas para as práticas agropecuárias e de contatos litológicos.

Considerando as classes morfodinâmicas de análise da vulnerabilidade da paisagem obtidas para a Sub-bacia em questão, constatou-se que 12,5% da área estudada corresponde às classes de muito baixa vulnerabilidade; 36,19% à classe baixa; 28,02% corresponde à classe moderada; 21,24% à classe de alta vulnerabilidade e cerca de 2,08% corresponde à classe de muito alta vulnerabilidade da paisagem (Figura 9). Desta forma, observa-se que na área de estudo ocorre maior estabilidade da paisagem aos processos morfodinâmicos, tais como erosão, movimentos de massa, dentre outros, para as áreas mais planas do relevo, com predominância de solos mais desenvolvidos, porém, ressalta-se a importância de estudos em maior escala de detalhe para corroborar esses dados e quantificar possíveis erros ou dados discrepantes para a análise.

Área Vulnerabilidade (%)

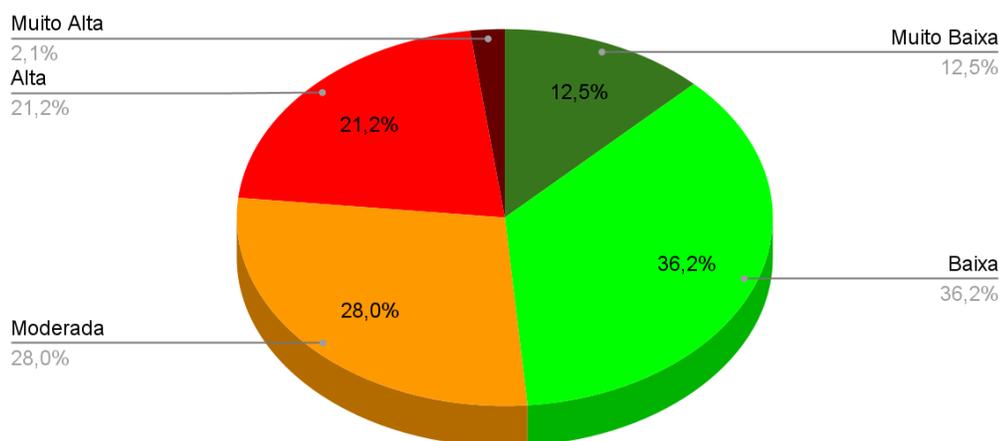


Figura 9 - Gráfico das áreas de vulnerabilidade ambiental para a sub-bacia do Rio Bodó, RN.
 Fonte: Resultados da pesquisa. Elaboração: autores (2022).

Quanto às unidades da paisagem que apresentaram maior instabilidade/vulnerabilidade, observou-se que ocorrem em áreas de acentuado gradiente de declividade, apresentando relevo fortemente dissecado, com a predominância de solos pouco desenvolvidos, com prevalência geral dos processos de morfogênese em detrimento da pedogênese. O mesmo foi verificado nas áreas que são ocupadas para as práticas agropecuárias, agricultura e baixa densidade de formação vegetal. Essas áreas, vale frisar, naturalmente comportam condições de instabilidade, porém, o fator antrópico tende a acentuar essa fragilidade natural, acarretando sua degradação e potencial perda dos solos e do seu equilíbrio dinâmico.

Deve-se ressaltar que as áreas de relevo escarpado (aquelas com declives > 45%) estão protegidas pelo atual código florestal brasileiro (BRASIL, 2012), pois são consideradas Áreas de Preservação Permanente (as APPs), bem como, as bordas das chapadas, como é o caso do relevo plano incluído nos limites da bacia em questão (BRASIL, 2012). Do mesmo modo, as faixas marginais dos cursos d'água perenes ou intermitentes também estão inclusas nesse fator de proteção, por isso, é de suma importância que o manejo e o uso da terra nas bacias hidrográficas levem em consideração à fragilidade do terreno em relação às pressões exercidas e sua capacidade de regeneração e equilíbrio dinâmico.

5. Considerações finais

Os resultados dessa pesquisa apontaram para a associação entre o fator de vulnerabilidade ambiental alta e os processos morfogenéticos, principalmente, nas vertentes escarpadas do relevo que delimitam essa bacia. É importante ressaltar que os processos morfogenéticos predominantes nas áreas de altitude que delimitam a bacia, podem acarretar numa maior perda de solos e, conseqüentemente, na deposição desses sedimentos nos cursos d'água, acarretando o assoreamento dos corpos hídricos. Com isso, pode-se acentuar os riscos de processos de enchentes e inundações nas áreas de planícies, o que se agrava com as práticas agropecuárias, desmatamento das matas ciliares e exploração dos recursos minerais, causando a degradação da terra e a perda da sua fertilidade natural.

Nesse sentido, a carta de vulnerabilidade ambiental é um instrumento de suma importância para o planejamento e a gestão ambiental dos recursos naturais no território e pode subsidiar as tomadas de decisão a partir do zoneamento das

áreas instáveis, auxiliando na identificação do passivo ambiental. Assim, a Carta de Vulnerabilidade Ambiental para a sub-bacia do Rio Bodó pode ser utilizada para contribuir para o debate dos processos decisórios para essa unidade de planejamento e, por conseguinte, subsidiar a proteção ambiental dos recursos ambientais nesses sistemas.

Em que pese os resultados alcançados, é importante destacar também a necessidade de novos estudos, bem como, o emprego de outras metodologias e pesquisas de campo em recortes espaciais de maior detalha, frise-se, que podem quantificar com maior acurácia a fragilidade potencial da sub-bacia e direcionar a correta gestão ambiental dos seus recursos e potencialidades, priorizando o manejo sustentável do território.

Referências

- ALMEIDA, J. R.; ARAÚJO, G. H. DE S.; GUERRA, A. J. T. *Gestão Ambiental de Áreas Degradadas*. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. 322 p.
- BATISTA, J. P. G.; DA SILVA, F. M. Avaliação da fragilidade ambiental na microbacia do riacho Cajazeiras no semiárido Potiguar. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 33, n. 1, p. 53-72, 2013.
- BECKER, B. K.; EGLER, C. A. *Detalhamento da metodologia para execução do zoneamento ecológico econômico pelos Estados da Amazônia Legal*. Brasília: SAE/MMA, 1996, 43p.
- BRASIL. *Lei 12651 de 25 de maio de 2012*. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Congresso Nacional. Disponível em: <http://www.jusbrasil.com.br/legislacao/1032082/lei-12651-12>. Acesso em: 06 dez. 2014.
- CECONI, D. E.; PICCILLI, D. G. A.; BERNARDI, F.; FENSTERSEIFER, P. Analysis of vulnerability for environmental planning of a water supply basin. *Ambiente & Sociedade*. São Paulo. Vol. 21, 2018. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0078r2vu18L1AO>.
- CREPANI, E., et al. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial. São José dos Campos, SP: *INPE*, jun. 2001, 113 p.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. *Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea*. Diagnóstico do município de Bodó, estado do Rio Grande do Norte. Organizado [por] João de Castro Mascarenhas, Breno Augusto Beltrão, Luiz Carlos de Souza Junior, Saulo de Tarso Monteiro Pires, Dunalson Eliezer Guedes Alcoforado da Rocha, Valdecílio Galvão Duarte de Carvalho. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.
- CPRM. - Serviço Geológico do Brasil. 2019. *Projeto: Evolução Crustal e metalogenia da Província Mineral do Seridó*. Arquivos vetoriais (shp) Carta geológica da folha Currais Novos - SB.24-Z-B-II; folha Açu - SB.24-X-D-V; folha Santa Cruz- SB-24-Z-B-III e folha Lajes - SB-24-X-D-VI. Sistema de Coordenadas Geográficas, SIRGAS-2000. Escala 1:100.000.
- FARIAS, P. K. P. *Gênese e levantamento de solos da Serra de Santana no Seridó Potiguar*. Mossoró, RN. f. 82, 2016. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água). Universidade Federal Rural do Semiárido. Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação, Mossoró, 2016.
- FISTAROL, P. H. B.; DOS SANTOS, J. Y. G. Implicações das alterações no uso e ocupação do solo nas perdas de solo da Bacia do Rio de Ondas, estado da Bahia. *Revista OKARA: Geografia em debate*, v. 14, n. 1, p. 81-103, 2020. João Pessoa, PB, ISSN: 1982-3878.
- FLORENZANO, T. G. *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- GOMES, R. L. Avaliação da fragilidade ambiental e vulnerabilidade natural à perda de solo da bacia hidrográfica do rio Almada. *Boletim de Geografia*, v. 31, n. 3, p. 41-53, 2013.
- GOUVEIA, I.C.M. C.; ROSS, J.L.S. Fragilidade Ambiental: uma Proposta de Aplicação de Geomorphons para a Variável Relevô. *Revista do Departamento de Geografia-USP*, v. 37, p. 123-136, 2019. Disponível em: <https://10.11606/rdg.v37i0.151030>. Acesso em: 20 jun. 2021.

- GUIMARÃES, F. S. et al. Uma Proposta para automatização do Índice de Dissecação do Relevo. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 18, n. 1, 2017.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Banco de Dados de Informações Ambientais - BDIA*. 2023. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/>. Acesso em: jan. 2023.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Base de dados por municípios das Regiões Geográficas Imediatas e Intermediárias do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.
- IBGE. *Manual Técnico da Vegetação Brasileira*. 2 ed. Rio de Janeiro, 2012.
- LIRA, K. C. S.; FRANCISCO, H. R.; FEIDEN, A. Classificação de fragilidade ambiental em bacia hidrográfica usando lógica Fuzzy e método AHP. *Sociedade & Natureza*. Uberlândia, MG, v. 34, e62872, 2022, ISSN 1982-4513.
- LUCENA, C. Y., LEAL DE SOUZA, J., QUEIROZ DA SILVA, B., SANTIAGO REIS, J., & LUNA LUCENA, R. (2022). A Serra de Santana no semiárido nordestino: aspectos geográficos e possibilidade de práticas sustentáveis. *Revista Geográfica De América Central*, 1(70), 449 - 476. Disponível a partir de <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/16549>. Acesso em: 10 jan. 2023.
- MARWELL, D. T. B. *Avaliação da vulnerabilidade ambiental, na Área de Influência Direta do Ramal do Agreste e nos cursos hídricos intermitentes e efêmeros interceptados por este empreendimento utilizando o método AHP e técnicas de geoprocessamento*. Brasília – DF, 2015. 34 p. Monografia (Curso de especialização em geoprocessamento ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2015.
- MEDEIROS, D. B. S. *Mapeamento e análise integrada das unidades de paisagem (geofácies) do Seridó Potiguar*. 2019. 200f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.
- MEDEIROS et al. Avaliação da vulnerabilidade ambiental na área do assentamento São Joaquim, Selvíria/MS. *Caminhos de Geografia*. Uberlândia, MG. v. 15, n. 49, p. 126-137, 2014.
- NICOLAU, R. F. Vulnerabilidade da paisagem à perda de solos da bacia hidrográfica do rio do Peixe – Goiás. *Caminhos de Geografia*. Uberlândia – MG, v. 19, n. 66, p. 285-296, 2018.
- PRONASSOLOS. *Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil - PronaSolos*. Geoportal - Embrapa solo. Disponível em: [Pronasolos \(cprm.gov.br\)](http://Pronasolos.cprm.gov.br). Acesso em: 1 jun. 2022.
- RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. *Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras*. 3. ed. rev. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPIS, 1995. 65 p.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. *Revista do departamento de geografia*, v. 8, p. 63-74, 1994.
- ROCHA, L. B. de O.; MAGRI, R. A. F. Predição da perda de solo por erosão laminar na bacia hidrográfica do Ribeirão Bocaina, Passos – MG. *Revista Caminhos de Geografia*. Uberlândia-MG, v. 23, n. 87, p. 153–174, 2022.
- SAATY, T.L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *J. Math. Psychol.*, v.15, p.234–281, 1977. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- SAATY, T. L. The Analytic Hierarchy Process. McGraw Hill, New York, 1980. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48: p. 9-26, 1990.
- SANTOS, J. Y. G.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M. Perdas de água e solo utilizando chuva simulada em diferentes coberturas superficiais e condições de umidade no semiárido paraibano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17(4): 217-228, 2012.
- SANTOS, P. A. F.; et al. Fragilidade Ambiental da bacia do Rio Ipiranga – PR. VI *Simpósio Nacional de Geomorfologia/Regional*. Conference on Geomorphology. Goiânia, 2006.

-
- SARAIVA, S. M. FRAGA, V. S.; ARAUJO FILHO, J. C.; SANTOS, R. F.; FELIX, E. S.; CAMPOS, M. C.; DIAS, B. S.; CARNEIRO, K. A. A. Caracterização de Planossolos nátricos em um gradiente pluviométrico no Semiárido brasileiro. In: RIBEIRO, J. C. (org.). *Educação em solos e meio ambiente*. Ponta Grossa: Atena Editora, 2021. cap. 1, p. 1-13.
- SILVA, M. P.; SANTOS, F. M.; LEAL, A. C. Planejamento Ambiental da Bacia Hidrográfica do Córrego da Olga, UGRHI Pontal do Paranapanema. São Paulo. *Soc. & Nat.* Uberlândia, 28 (3): 409-428, set/dez/2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1982-451320160307>.
- SOUZA, S. O.; VALE, C. C.; NASCIMENTO, F. H. Bacia do rio Peruípe (BA): ensaio de classificação morfométrica por meio de dados SRTM. *Revista Caminhos de Geografia*. Uberlândia, v. 14, n. 47 Set. 2013 p. 208–222. ISSN 1678-6343.
- SPÖRL C. Análise da fragilidade ambiental relevo-solo com aplicação de três modelos alternativos nas altas bacias do rio Jaguari-Mirim, ribeirão do quartel e ribeirão da Prata. *GEOUSP – Espaço e Tempo*, 2001.
- SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. *Geosp – Espaço e Tempo*, São Paulo, n. 15, p. 39-49, 2004.
- TAVARES, K. S. R.; ROMÃO, P. A.; OLIVEIRA, I. J. Vulnerabilidade Ambiental no Município de São Domingos (GO). *Revista Brasileira de Geografia Física*. v. 13, n. 05, p. 2212-2232, 2020.
- TRICART, J. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977, 91p.
- ZANELLA, M. A.; OLÍMPIO, J. L.; COSTA, M. C. L.; DANTAS, E. W. C. Vulnerabilidade Socioambiental do Baixo Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Cocó, Fortaleza-CE. *Soc. & Nat.*, Uberlândia, 25 (2): 317-332, 2013.