UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA
CENTRO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS - CECEN
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA, NATUREZA E DINÂMICA DO ESPAÇO - PPGEO

THAYRLAN SILVA SOUZA

# VULNERABILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PINDARÉ – MA

Linha de pesquisa: Dinâmica da Natureza e Conservação

São Luís - MA
2024

**THAYRLAN SILVA SOUZA**

# VULNERABILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PINDARÉ – MA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço (PPGeo) da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Araujo dos Santos.

Linha de pesquisa: Dinâmica da Natureza e Conservação.

**São Luís - MA**

**2024**

Souza, Thayrlan Silva.

Vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré – MA / Thayrlan Silva Souza. – São Luís (MA), 2024.

160p.

Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço) Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Araujo dos Santos.

1. Vulnerabilidade. 2. Bacia hidrográfica. 3. Rio Pindaré. I.Título.

CDU: 556.51(812.1)

**Elaborado por Luciana de Araújo – CRB 13/445**

**VULNERABILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PINDARÉ – MA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço (PPGeo) da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Geografia.

Aprovado 20/03/2024

BANCA EXAMINADORA

gov.br
Documento assinado digitalmente
LUIZ CARLOS ARAUJO DOS SANTOS
Data: 22/03/2024 09:40:19-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

---

Prof. Dr. Luiz Carlos Araujo dos Santos (Orientador)
Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

gov.br
Documento assinado digitalmente
NEISE MARE DE SOUZA ALVES
Data: 27/03/2024 16:36:02-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

---

Profa. Dra. Neise Mare de Souza Alves
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

gov.br
Documento assinado digitalmente
MELINA FUSHIMI
Data: 28/03/2024 10:26:27-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

---

Profa. Dra. Melina Fushimi
Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

Dedico este trabalho à minha mãe, Fernanda, e ao meu padrasto, João, “Tio João”. Que nos momentos de choro, aliviaram meu coração; nos momentos felizes, alegraram-se comigo; e que sempre ao meu lado estarão, nas pelejas da vida.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas bênçãos concedidas.

À minha preciosa mãe, Fernanda Silva Gomes, pela vida e por toda a persistência na luta para criar seus filhos com amor e carinho.

Ao meu padrasto, João Nunes Gomes, e meus irmãos, Thayná Silva Souza, Thalisson Silva Souza e Wendel Dias Melo, pelo amor e incentivo a nunca desistir de um futuro melhor.

À minha avó, Irene Dias Melo, por todo amor concedido ao seu neto mais velho.

À minha linda noiva, Giselle Chrystina do Vale Martins, que trouxe felicidade a um rapaz tímido, me amou, me incentivou e esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis.

À minha sogra, Elizangela do Vale Martins, e seus pais Luzia do Vale Martins e Antonio Cícero Oliveira Martins "Paciência", pelo acolhimento, amizade e apoio.

Ao professor Dr. Luiz Carlos Araújo dos Santos, "Luizinho", meu orientador desde a iniciação científica até o mestrado, que contribuiu com seu apoio, auxílio e acolhimento durante minha trajetória acadêmica, e que, hoje, além de ser um amigo, é um exemplo de profissional.

Ao professor Dr. Rafael Brugnolli Medeiros, pelo apoio, auxílio e total disponibilidade em ajudar.

À profª. Drª. Neise Mare de Souza Alves e à profª. Drª. Melina Fushimi, pelas considerações e sugestões feitas na qualificação, que em muito contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa.

À Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), por investir nos discentes e incentivar a pesquisa na Instituição.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço - PPGeo, pelo apoio e auxílio.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA), pelo financiamento da pesquisa.

Ao Grupo de Pesquisa Geomorfologia e Mapeamento (GEOMAP) e ao Laboratório de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, que serviram de apoio no desenvolvimento do estudo.

Aos amigos do Curso de Geografia da UEMA, Marly Moraes e Emerson Guedes, pela amizade e carinho; aos amigos do Mestrado em Geografia, Marcos Vinícius e Juciana Birino, pela amizade e melhor companhia nas viagens; e aos amigos Paulo Zidane e Lucas Candeira, pela amizade, lealdade e sinceridade.

Muito obrigado a todos!

*“Não há nada na natureza que não seja belo”.*

**(Alfred Lord Tennyson)**

## RESUMO

A presente pesquisa visa analisar a vulnerabilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA, considerando o uso e a cobertura da terra entre os anos de 1991 e 2021. Para alcançar o objetivo proposto, realizou-se pesquisa bibliográfica; seleção de bases cartográficas; aplicação de técnicas de geoprocessamento para a produção de mapas temáticos, utilizando uma escala de 1:250.000; e o uso do Sistema de Informações Geográficas QGIS. Quanto à abordagem metodológica, recorreu-se a Crepani *et. al.* (2001) para a obtenção dos fatores de vulnerabilidade, avaliando os diferentes graus predominantes na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, a partir de três tipos de meios tidos como unidades ambientais, sendo eles: meios estáveis, prevalecendo a pedogênese; meios intergrades, nos quais há equilíbrio entre pedogênese e morfogênese; e os fortemente instáveis, predominando a morfogênese. Os resultados finais permitiram identificar que, quanto aos aspectos estáveis da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, os cursos de água e as áreas localizadas na parte sul da bacia – onde identificou-se solos bem desenvolvidos, com a presença de cobertura vegetal remanescente –, baixa taxa de energia potencial erosiva do relevo, além de, em sua maioria, níveis estáveis de intensidade pluviométrica, correspondendo a ambientes com ocorrência do processo de pedogênese. Quanto às unidades de paisagem consideradas vulneráveis, encontrou-se a maior predominância ao norte da bacia, com a presença das unidades litoestratigráficas Depósitos Aluvionares, Depósitos de Pântanos e Mangues e os Depósitos Flúvio-lagunares. Essas áreas não são caracterizadas apenas pela presença de solos pouco desenvolvidos, mas também por um intenso processo de retenção de água e dificuldades no escoamento superficial, como as múltiplas classes de plintossolo. Nas áreas centrais da bacia, identificaram-se níveis elevados de energia potencial erosiva do relevo, relacionados à declividade e às dissecações horizontais e verticais, além de altas variações de intensidade pluviométrica no ano de 1991. Ademais, o uso e a cobertura da terra mostrou-se intenso nessas regiões, com predominância de pastagem, soja e eucalipto, em detrimento da cobertura vegetal natural. Por fim, a bacia hidrográfica do Rio Pindaré apresentou múltiplos processos de modificação de suas unidades de paisagem, sendo mais estáveis ao sul, intergrade no centro e vulnerável ao norte. Tais informações fundamentam-se em vista do crescente processo de desenvolvimento agropecuário e urbano na região nos últimos trinta anos, além do uso desenfreado dos recursos naturais e da supressão da vegetação, atividades que contribuem para o crescente estado de vulnerabilidade ambiental da área, propiciando, cada vez mais, cenários de eventos catastróficos para as características ambientais da bacia hidrográfica do Rio Pindaré.



**Palavras-chave:** Vulnerabilidade ambiental; Bacia hidrográfica; Rio Pindaré.

## ABSTRACT

This research aims to analyze environmental vulnerability in the Pindaré river basin – MA, considering the use and land cover there between the years 1991 to 2021. To achieve the proposed objective, bibliographic research was carried out; selection of cartographic bases; application of geoprocessing techniques to produce thematic maps, using a scale of 1:250,000; and the use of the QGIS Geographic Information System. As a methodological path, we used Crepani et. al. (2001) to obtain vulnerability factors, where the different degrees of vulnerability prevalent in the Pindaré river basin were assessed, based on three types of environments considered as environmental units, namely: stable environments, in which pedogenesis prevails; intergrade environments, in which there is a balance between pedogenesis and morphogenesis; and those that are highly unstable, in which morphogenesis predominates. The final results made it possible to identify that regarding the stable aspects of the Pindaré river basin, the watercourses and areas located in the southern part of the basin, where well-developed soils were identified, with the presence of remaining vegetation cover, low rate of erosive potential energy of the relief, in addition to, for the most part, stable levels of rainfall intensity, correspond to environments with the occurrence of the pedogenesis process. As for the landscape units considered vulnerable, the greatest predominance was found in the north of the basin, with the presence of the lithostratigraphic units Alluvial Deposits, Wetland and Mangrove Deposits and Fluvio-lagoon Deposits, characterizing, in addition to the presence of poorly developed soils, also an intense process of water retention and difficulties in surface runoff, such as the multiple classes of plintosols. In the central areas of the basin, high levels of potential erosive energy of the relief were identified, in relation to declivity and horizontal and vertical dissections, in addition to high variations in rainfall intensity in 1991. Furthermore, the use and cover of the land demonstrated is intense in these regions, covering mainly pasture and monocultures, damaging the natural vegetation cover. Finally, the Pindaré river basin presented multiple processes of modification of its landscape units, which are more stable in the south, intergrade in the center and vulnerable in the north. Such information is encouraged in view of the growing process of agricultural and urban development in the region in the last thirty years, in addition to the unrestrained use of natural resources and suppression of vegetation, activities that contribute to the growing state of environmental vulnerability in the area, providing each increasingly scenarios of catastrophic events for the environmental characteristics of the Pindaré river basin.



**Keywords:** Vulnerability; Hydrographic basin; Pindaré River.

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1** – Mapa de localização da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA ..... 20
**Figura 2** – Processamento da direção de fluxo na BHRPind ..... 47
**Figura 3** – Dimensão interfluvial média e grau de entalhamento dos vales na BHRPind..... 48
**Figura 4** – Proposta alternativa 3 para classificação do índice de dissecação do relevo na BHRPind..... 49
**Figura 5** – Banco de dados Coleções Mapbiomas..... 51
**Figura 6** – Metodologias e critérios para as distinções dos pesos ..... 52
**Figura 7** – Aplicação da vulnerabilidade ambiental na calculadora raster..... 61
**Figura 8** – Mapa de geologia da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA ..... 68
**Figura 9** – Vulnerabilidade da geologia das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré ..... 71
**Figura 10** – Mapa de solos da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA..... 74
**Figura 11** – Vulnerabilidade dos solos das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré..... 76
**Figura 12** – Mapa de geomorfologia da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA..... 80
**Figura 13** – Mapa do Índice de Dissecação do relevo da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA..... 82
**Figura 14** – Mapa clinográfico da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA..... 85
**Figura 15** – Vulnerabilidade da geomorfologia das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré..... 87
**Figura 16** – Mapa de Intensidade Pluviométrica da bacia hidrográfica do Rio Pindaré/ MA (1991 - 2021) ..... 89
**Figura 17** – Média do comportamento das precipitações (Normal Climatológica 1991 - 2020) ..... 90
**Figura 18** – Mapa de intensidade pluviométrica da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA (2021) ..... 91
**Figura 19** – Vulnerabilidade do clima das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré (1991 - 2011)..... 93
**Figura 20** – Voçoroca localizada no povoado de Arara, município de Santa Luzia ..... 94
**Figura 21** – Vulnerabilidade do clima das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré (2021) ..... 96

**Figura 22** – (A) Área urbana nas proximidades do curso d'água, município de Cajari; (B) Lago Viana, município de Viana ..... 97
**Figura 23** – Mapa de uso e cobertura da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA (2011) ... 103
**Figura 24** – Mosaico de vegetação (pastagem) no município de Bom Jesus das Selvas ..... 104
**Figura 25** – Área urbanizada com redondezas de pastagem e vegetação natural no município de Alto Alegre do Pindaré - MA ..... 105
**Figura 26** – Áreas de formações florestais em terras indígenas na região do Rio Caru ..... 105
**Figura 27** – Mapa de uso e cobertura da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA (2021) ... 108
**Figura 28** – Evolução da vulnerabilidade do uso e cobertura da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA entre os anos de 1991 e 2011 ..... 111
**Figura 29** – Vulnerabilidade do uso e cobertura da terra das Unidades de Paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré (2021) ..... 114
**Figura 30** – Corpo d'água no município de Cajari/MA ..... 116
**Figura 31** – Evolução da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA entre os anos de 1991 e 2011 ..... 119
**Figura 32** – Trecho do Rio Pindaré nas proximidades do município de Pindaré-Mirim ..... 120
**Figura 33** – Áreas com a presença de pastagem de solo exposto no Rio Zutiua, principal afluente do Rio Pindaré, município de Alto Alegre do Pindaré ..... 121
**Figura 34** – Voçoroca nas proximidades do município de Buriticupu ..... 122
**Figura 35** – Áreas descobertas com relevo irregular na divisa entre Bom Jesus das Selvas e Açailândia ..... 123
**Figura 36** – Mapa de vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA (2021) ..... 125
**Figura 37** – Cenários de características de potenciais eventos ocorrentes na bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA ..... 129

## LISTA DE QUADROS

**Quadro 1** – Metodologias para elaboração das variáveis ambientais e seus respectivos pesos de vulnerabilidade para a bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA ..... 43
**Quadro 2** – Matriz dos índices de dissecação do relevo ..... 48
**Quadro 3** – Parâmetros de avaliação utilizados na matriz de vulnerabilidade fator x evento. 62

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1** – Regras para reclassificação dos intervalos de declividade ..... 46
**Tabela 2** – Escala de vulnerabilidade à denudação das rochas mais comuns..... 53
**Tabela 3** – Critério para atribuição de pesos (Geologia) ..... 54
**Tabela 4** – Critério para atribuição de pesos (Solos)..... 54
**Tabela 5** – Valores de vulnerabilidade para a amplitude altimétrica..... 55
**Tabela 6** – Valores de vulnerabilidade para a amplitude interfluvial..... 55
**Tabela 7** – Critério para atribuição de pesos (Declividade) ..... 56
**Tabela 8** – Valores de vulnerabilidade para a intensidade pluviométrica ..... 57
**Tabela 9** – Valores de vulnerabilidade para o uso e cobertura da terra..... 57
**Tabela 10** – Escala absoluta, definição e justificativa para o processo decisório com a AHP 59
**Tabela 11** – Matriz de comparação pareada ..... 59
**Tabela 12** – Matriz padronizada ..... 59
**Tabela 13** – Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n..... 60
**Tabela 14** – Nomenclatura dos graus de vulnerabilidade da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA ..... 61
**Tabela 15** – Unidades litoestratigráficas da bacia hidrográfica do Rio Pindaré e suas respectivas concentrações..... 67
**Tabela 16** – Vulnerabilidade da geologia das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA ..... 70
**Tabela 17** – Classes de solos da bacia hidrográfica do Rio Pindaré e suas respectivas concentrações..... 73
**Tabela 18** – Vulnerabilidade dos solos das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA ..... 75
**Tabela 19** – Unidades Geomorfológicas da bacia hidrográfica do Rio Pindaré e suas respectivas concentrações..... 79
**Tabela 20** – Dissecação do relevo na bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA..... 81
**Tabela 21** – Declividade e formas de relevo da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA..... 84
**Tabela 22** – Vulnerabilidade da geomorfologia das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré..... 86
**Tabela 23** – Precipitação Média Anual das estações analisadas para a BHRPind ..... 88
**Tabela 24** – Vulnerabilidade do clima das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA ..... 95

**Tabela 25** – Classes de uso e cobertura da terra na BHRPind no ano de 1991 ..... 99
**Tabela 26** – Classes de uso e cobertura da terra na BHRPind no ano de 2001 ..... 100
**Tabela 27** – Classes de uso e cobertura da terra na BHRPind em 2011 ..... 102
**Tabela 28** – Classes de uso e cobertura da terra na BHRPind em 2021 ..... 106
**Tabela 29** – Evolução do uso e cobertura da terra entre os anos de 1991 a 2021 na BHRPind ..... 107
**Tabela 30** – Vulnerabilidade do uso e cobertura da terra na BHRPind entre 1991 e 2011 ... 109
**Tabela 31** – Vulnerabilidade do uso e cobertura da terra na BHRPind em 2021 ..... 112
**Tabela 32** – Vulnerabilidade ambiental da BHRPind (1991-2011) ..... 118
**Tabela 33** – Vulnerabilidade ambiental da BHRPind 2021 ..... 124
**Tabela 34** – Matriz de vulnerabilidade Fator x Evento da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA ..... 128
**Tabela 35** – Parâmetros de potenciais eventos ocorrentes na bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA ..... 129

## LISTA DE SIGLAS

AHP – Analytical Hierarchy Process

APA – Áreas de Proteção Ambiental

BH – Bacia Hidrográfica

BHRPind – Bacia Hidrográfica do Rio Pindaré

BDIA – Banco de Dados de Informações Ambientais

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FUNAI – Fundação Nacional do Índio

GDAL – Biblioteca de Abstração de dados Geoespaciais

GEOMAP – Grupo de Pesquisa Geomorfologia e Mapeamento

GEOSGB – Dados e Informações do Serviço Geológico do Brasil

GPS – Global Positioning System

IBGE – Instituto de Brasileiro de Geografia e Estatística

IMESC – Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

km² – quilômetro quadrado

mm – milímetro

MAPBIOMAS – Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil

MDE – Modelo Digital de Elevação

PI – Plano de Informação

SIBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

SIG – Sistemas de Informações Geográficas

SIRGAS 2000 – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000

TOPODATA – Banco de Dados Geomorfométricos

UEMA – Universidade Estadual do Maranhão

UTM – Universal Transversa de Mercartor

ZEE-MA – Zoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia Legal

**SUMÁRIO**

**CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO ..... 187**
**CAPÍTULO 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA ..... 21**
**2.1 O conceito de bacia hidrográfica como unidade de estudo ..... 22**
**2.2 Análise da paisagem em bacias hidrográficas ..... 25**
**2.3 Vulnerabilidade ambiental em bacias hidrográficas ..... 30**
**2.4 Vulnerabilidade e elementos geoambientais ..... 33**
**2.5 Uso e cobertura da terra: reflexões conceituais ..... 35**
**2.6 Geoprocessamento, sistema de informação geográfica e sensoriamento remoto ..... 38**
**CAPÍTULO 3: PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS ..... 41**
**CAPÍTULO 4: INVENTÁRIO E VULNERABILIDADE DOS ELEMENTOS AMBIENTAIS ..... 64**
**4.1 Geologia ..... 65**
**4.2 Vulnerabilidade da geologia das unidades de paisagem ..... 69**
**4.3 Solos ..... 72**
**4.4 Vulnerabilidade da pedologia das Unidades da Paisagem ..... 75**
**4.5 Geomorfologia ..... 77**
**4.6 Dissecação do Relevo ..... 81**
**4.7 Declividade ..... 83**
**4.8 Vulnerabilidade da geomorfologia das unidades de paisagem ..... 86**
**4.9 Intensidade Pluviométrica ..... 88**
**4.10 Vulnerabilidade do clima das unidades de paisagem dos anos de 1991, 2001 e 2011 ..... 92**
**4.11 Vulnerabilidade do clima das unidades de paisagem do ano de 2021 ..... 94**
**4.12 Uso e cobertura da terra ..... 97**
**4.13 Vulnerabilidade do uso e cobertura da terra (1991, 2001 e 2011) ..... 109**
**4.14 Vulnerabilidade do uso e cobertura da terra (2021) ..... 112**
**CAPÍTULO 5: VULNERABILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PINDARÉ – MA ..... 115**
**5.1 Vulnerabilidade ambiental das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré – MA (1991 a 2011) ..... 116**
**5.2 Vulnerabilidade ambiental das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA (2021) ..... 120**

**5.3 Zoneamento ambiental como subsídio ao planejamento ambiental e mitigação de vulnerabilidades ..... 131**
**CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS ..... 134**
**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 139**
**ANEXOS ..... 149**
**ANEXO A – Comparação entre a legenda inicial e atual do projeto Radambrasil (mapa fitoecológico) e os respectivos valores na escala de vulnerabilidade ..... 149**
**ANEXO B – IMIRANTE.COM. Entenda o que são voçorocas, enormes crateras que já 'engoliram' casas e ameaçam bairros em cidades do Maranhão. 2023. ..... 158**

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

*Trecho do rio Pindaré, município de Cajari (2023).*

É notório que, atualmente, o desenvolvimento do meio urbano, o crescimento populacional e diversas outras alterações no contexto da fisionomia da paisagem abrangem em caráter global. As percepções dessas degradações, de modo geral, correspondem a um possível processo de mitigação de tais acontecimentos, relacionando-as com fatores de reversão do impacto ambiental. Nesse contexto, Ribeiro (2010) define a vulnerabilidade como a capacidade de um grupo humano de preparar-se para um desastre, todavia, depende de uma série de fatores, envolvendo: percepção do risco; capacidade de prever o desastre; e possibilidade de adotar medidas eficazes para proteger o grupo social do desastre, o que é efêmero e pode ocorrer surpreendentemente. Assim, o diagnóstico da vulnerabilidade é relativo à percepção do risco.

Considerando a problemática da escassez de pesquisas na área e com o objetivo de auxiliar no planejamento de mitigação do impacto ambiental, o presente estudo permite abranger o viés da vulnerabilidade ao processo de alteração do uso e cobertura da terra, além dos possíveis cenários de mitigação. Localizada no chamado Arco Amazônico (fronteira do desmatamento, onde a destruição das florestas alcança níveis drásticos atualmente), a bacia hidrográfica do Rio Pindaré está localizada no oeste do Maranhão, em uma região que abrange trinta e dois municípios do Estado.

A bacia hidrográfica do Rio Pindaré faz parte da bacia hidrográfica do Rio Mearim, e sua localização apresenta-se como um ponto estratégico. Ela está situada em uma área de 40.401,96 km² (Figura 1), que integra a borda oriental da Amazônia Legal. Seu manancial principal possui cerca de 620,87 km de extensão, sendo um rio caudaloso, com piscosidade e navegabilidade, importante nos aspectos sociais, econômicos e ambientais da região oeste do estado do Maranhão.

É fato, segundo Prates e Bacha (2010), que a cobertura vegetal presente no oeste do Maranhão e leste do Pará passa por um processo de redução, correspondendo a um quarto da superfície dessas regiões. Esse contexto pode ser explicado a partir de diversos avanços de padrões de uso, como a pecuária, agricultura, urbanização e retirada ilegal de madeira. Tais atividades, além de acarretar um incessante processo de degradação ambiental, vulnerabilidade social e violência, também levam à “cultura” do desmatamento, apesar dos poucos benefícios econômicos resultantes desses processos de deterioração.

Essa problemática caracteriza algo cada vez mais relatado, com o processo de perturbação e deterioração de áreas que não deveriam constatar alterações de cunho antrópico, e a bacia hidrográfica do Rio Pindaré não é uma exceção da regra. A bacia, em seus limites, abrange uma área concentrada de Terras Indígenas, Áreas de Proteção Ambiental (APA) e Unidades de Proteção Integral, tentando, algumas sem sucesso, resistir às ações antrópicas,

sendo elas: as terras indígenas (Arariboia, Awá, Caru, Governador Krikati e Rio Pindaré), a APA da Baixada Maranhense, cujas características naturais estão quase totalmente alteradas, e a Unidade de Proteção Integral da Reserva Biológica do Gurupi, que vem sofrendo com a intensa supressão da vegetação.

Atrelado a isso, entende-se que tais atividades de agricultura, pecuária e retirada ilegal de madeira na bacia do Rio Pindaré ocasionam um intenso processo de assoreamento em seus rios (Rio Buriticupu, Zutiua e Caru), além do rio principal, acarretando, assim, um possível estado de difícil reversão.

Assim, é notório que os processos de supressão da vegetação nativa, empobrecimento dos solos, assoreamento, contaminação de recursos hídricos e a redução da biodiversidade correspondem a uma vulnerabilidade que não impacta somente os parâmetros ambientais, mas também o contexto socioeconômico. Observa-se, assim, a importância do estudo da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, considerando sua constante impactação pela ação humana e a escassa disponibilidade de estudos voltados principalmente para as questões físicas, ambientais e antrópicas. Portanto, o presente projeto visa a constatação desses graus de vulnerabilidade ambiental, buscando relacioná-los com as mudanças no uso e cobertura da terra na área da bacia em múltiplas faixas temporais.

Considerando as questões expostas anteriormente, foram estabelecidos os objetivos gerais e específicos da pesquisa. O objetivo geral deste estudo visa analisar a vulnerabilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, considerando o uso e a cobertura da terra no período de 1991 e 2021. Como objetivos específicos, tem-se: caracterizar o uso e a cobertura da terra na bacia hidrográfica do Rio Pindaré entre os anos de 1991 a 2021; identificar a vulnerabilidade dos parâmetros físicos e do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do Rio Pindaré; estabelecer o grau de vulnerabilidade ambiental, considerando as mudanças têmporo-espaciais no uso e cobertura da terra.

A dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço/PPGEO/UEMA foi subdividida em oito capítulos, organizados da seguinte forma:

**Capítulo I:** São apresentadas as principais questões que direcionam esta pesquisa, bem como os objetivos e hipóteses a serem respondidos ao longo dos capítulos.

**Capítulo II:** Pressupostos teóricos e metodológicos acerca da vulnerabilidade ambiental aplicada em bacias hidrográficas, considerando: o conceito de bacia hidrográfica como unidade de estudo, a análise da paisagem em bacias hidrográficas, a vulnerabilidade ambiental em bacias hidrográficas, a vulnerabilidade e os elementos geoambientais, o uso e a

cobertura da terra e suas reflexões conceituais, e o geoprocessamento, sistema de informação geográfica e sensoriamento remoto.

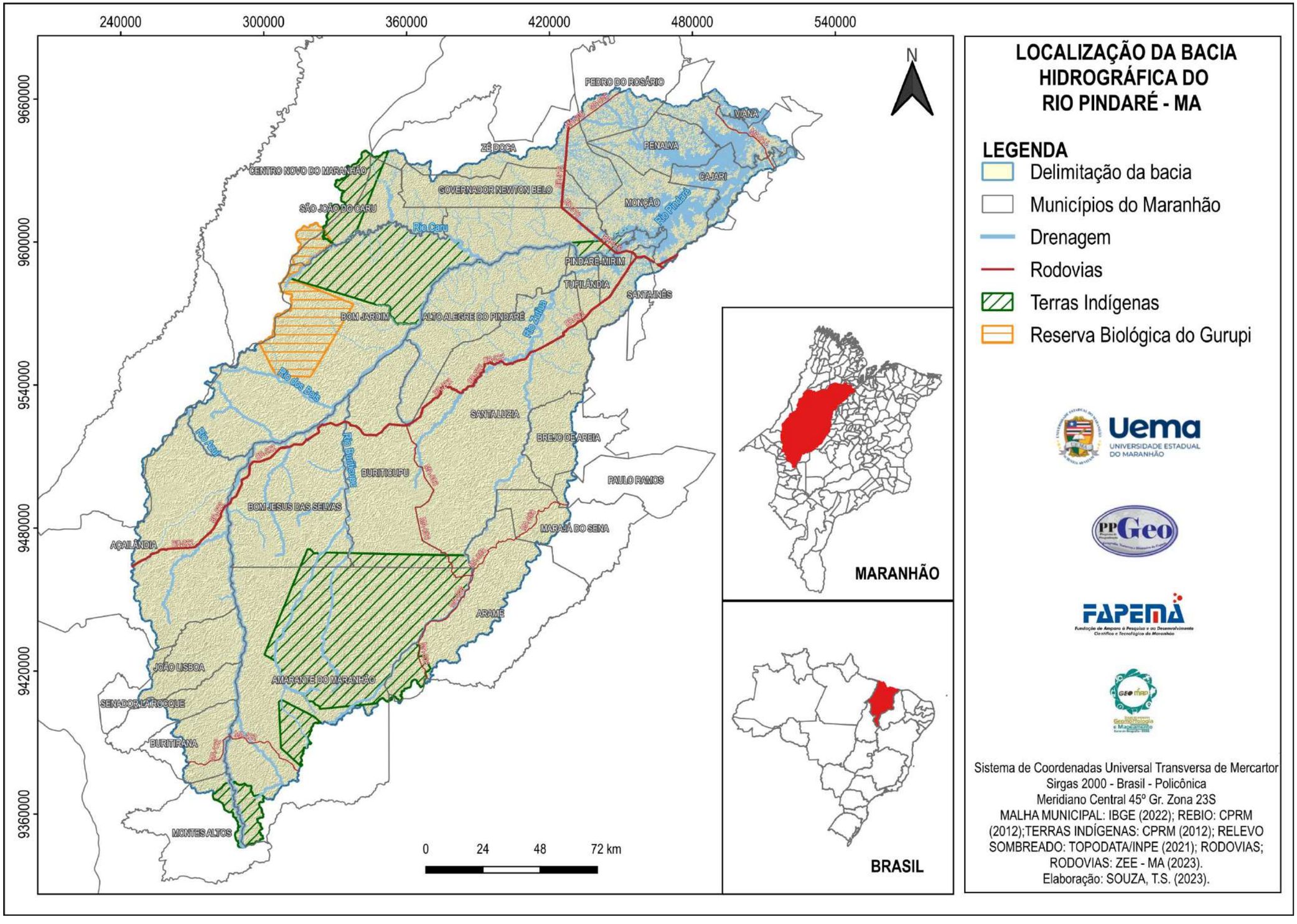
**Capítulo III:** Procedimentos metodológicos para o desenvolvimento da pesquisa em vulnerabilidade ambiental – expõe os procedimentos utilizados e as adaptações realizadas para a bacia hidrográfica do Pindaré, desde o levantamento de dados até a representação dos produtos cartográficos.

**Capítulo IV:** Caracterização dos elementos ambientais da bacia hidrográfica do Rio Pindaré e suas vulnerabilidades – buscou-se compreender as características ambientais da área de estudo, tais como: geologia, geomorfologia, solos, declividade, dissecação do relevo e clima, além de obter dados e informações sobre os diferentes tipos de uso da terra na bacia. Tal análise contribuiu para a correlação entre parâmetros físicos e as classes de uso antrópico na bacia do Rio Pindaré. Essa etapa representa valor essencial para o diagnóstico e indicadores de vulnerabilidade ambiental.

**Capítulo V:** Vulnerabilidade ambiental – apresenta as análises e discussões sobre os resultados da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré.

**Capítulo VI:** Conclusão – se discute as observações mais relevantes sobre a pesquisa e, conseguinte, apresentam-se as conclusões sobre a questão central tratada na dissertação.

**Figura 1** – Mapa de localização da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2022).

# CAPÍTULO 2

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA

*Lago em Pindaré-Mirim, proximidades do Rio Zutiua (2021).*

Os pressupostos teórico-metodológico foram organizados e apresentam as seguintes reflexões: i) o conceito de bacia hidrográfica como unidade de estudo; ii) análise da paisagem em bacias hidrográficas; iii) vulnerabilidade ambiental em bacias hidrográficas; iv) vulnerabilidade e elementos geoambientais; v) uso e cobertura da terra: reflexões conceituais; e vi) geoprocessamento, sistema de informação geográfica e sensoriamento remoto.

## 2.1 O conceito de bacia hidrográfica como unidade de estudo

Desde o processo de povoamento do território brasileiro, um parâmetro físico é evidente tanto para especialistas nas geociências quanto para o senso comum: a abundância de água. Com tal abundância, surge a necessidade de regulação do uso desse recurso, buscando a melhor forma de utilizá-lo.

Nessa busca, surgem as delimitações territoriais, que visam aprimorar a compreensão da dinâmica de percurso e uso da água, originando o termo “bacias hidrográficas” (BH). Em si, no contexto do planejamento territorial, a bacia hidrográfica é colocada como uma unidade básica de análise para o aperfeiçoamento de ações e medidas estruturais e não estruturais, considerando a integração entre a gestão dos recursos hídricos e a gestão ambiental (Carvalho, 2020). A Lei Federal nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997, institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, na qual a bacia hidrográfica se apresenta como um elemento destes recursos. Ainda segundo Carvalho (2020), a delimitação desse território é elaborada a partir de divisores de água, permitindo a análise sistêmica dos elementos, fatores e relações ambientais, sociais e econômicas, considerando as demandas e ofertas existentes dentro e fora de seus limites.

Em relação ao conceito de bacia hidrográfica, há divergências que surgem das diferentes formas de análise, sejam elas geográficas ou não. Para se chegar a uma conceituação adequada para este estudo, é necessário considerar diversos parâmetros de abordagem do conceito, abrangendo categorias da geografia que não se restringem apenas ao ambiente.

A bacia hidrográfica, etimologicamente, é a área de drenagem onde há um curso principal e seus afluentes, seguindo a topografia do terreno com um começo e um fim, ou seja, suas nascentes e a foz. Nesse sentido, Teodoro *et al.* (2007, p. 138) afirma que

> Diversas definições de bacia hidrográfica foram formuladas ao longo do tempo. Percebe-se, nestes autores, grande semelhança e consideração deste recorte espacial, baseado na área de concentração de determinada rede de drenagem. Entretanto as definições que envolvem as subdivisões da bacia hidrográfica (sub-bacia e microbacia), apresentam abordagens diferentes tocando fatores que vão do físico ao ecológico.

Já Santana (2003, p. 28) coloca que:

> De maneira geral, pode-se conceituar bacia hidrográfica como uma área geográfica natural, delimitada pelos pontos mais altos do relevo (espigões, divisores de água), dentro dos quais a água proveniente das chuvas é drenada superficialmente por um curso d'água principal até sua saída da bacia, no local mais baixo do relevo, que corresponde à foz desse curso d'água.

No contexto dos recursos hídricos, levando a bacia hidrográfica a um estágio exclusivamente físico:

> A bacia hidrográfica pode ser considerada, em linhas gerais, um sistema físico onde a entrada de água é o volume precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório e a água evapotranspirada. Em termos gerais, ela provê uma unidade física bem definida para estudos hidrológicos, tendo uma única forma de entrada (input), a precipitação, e a saída é dada pelo runoff no exutório da bacia, consideradas as perdas por evapotranspiração. Em macroescala, como no caso de grandes bacias hidrográficas, o padrão de runoff e suas intensidades e sazonalidades poderão ser controlados, primariamente, pelos efeitos climáticos. Este padrão geral reflete os padrões de precipitação e circulação geral da atmosfera. Para comparação entre bacias hidrográficas individuais, a geologia, morfometria da bacia, solos e vegetação, assim como os aspectos climáticos, interagem entre si para determinar o padrão natural sazonal de variação de runoff (Petts; Foster, 1990 *apud* Rocha; Santos, 2018, p. 2).

Acerca dos parâmetros físicos, estes são envolvidos sob a perspectiva dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, sendo gerenciados principalmente a partir do conceito de ciclo hidrológico.

Segundo Lima (2008), o ciclo hidrológico, como o próprio nome sugere, remete a um processo sem começo nem fim, no qual a água é evaporada dos oceanos e da superfície dos continentes, realocando-se na atmosfera. Com a umidade presente na atmosfera, a água sofre o processo de precipitação, tanto em oceanos como em continentes. A água precipitada pode ser interceptada, infiltrada no solo e absorvida pelas plantas, ou escoar pela superfície.

> Parte da água estocada na superfície terrestre é transferida para a baixa atmosfera por evaporação ou evapotranspiração, no caso da inclusão de perda d'água pela transpiração das plantas. O vapor d'água contido na atmosfera até uma certa altitude pode ser condensado em função do próprio rebaixamento de temperaturas com altitude e também pela presença de micropartículas em suspensão que funcionam como núcleos de condensação (Coelho Neto, 2003, p. 96).

Nas bacias hidrográficas (BH), o ciclo hidrológico é apresentado como um processo que, embora não tenha começo e fim, é passível de influência antrópica, podendo sofrer alterações em sua dinâmica. Esse ciclo está diretamente interligado com o funcionamento do rio principal e seus afluentes, principalmente no que diz respeito ao processo de escoamento da água. Outros elementos das BH se unem ao ciclo e, sendo correlacionados e adicionados à ação

humana, definem e auxiliam diversos outros conceitos que surgem nos parâmetros geoambientais das bacias.

Coelho Neto (2003) apresenta alguns desses elementos, incluindo um termo comumente usado como sinônimo de bacias hidrográficas: a bacia de drenagem. Segundo a autora,

> Bacia hidrográfica ou bacia de drenagem é uma área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos em uma saída comum, num determinado ponto de um canal fluvial. O limite de uma bacia de drenagem é conhecido como divisor de drenagem ou divisor de águas (Coelho Neto, 2003, p. 97).

Os divisores de águas, também conhecidos como interflúvios, são linhas divisórias situadas nas partes mais elevadas do relevo, no encontro de planos que delimitam a mudança e sentido no escoamento das águas. Essas linhas desenham a forma da bacia hidrográfica, distinguindo uma das outras (Marcuzzo; Souza; Almeida, 2016).

Outro parâmetro importante em bacias hidrográficas, que deve ser considerado em sua análise, é a hierarquização fluvial. Segundo Coelho Neto (2003), uma bacia hidrográfica pode variar em tamanho, indo desde a bacia do rio Amazonas até bacias de poucos metros quadrados, que drenam para a cabeça de um pequeno canal erosivo ou, simplesmente, para o eixo de um fundo de vale não canalizado. Assim, a autora afirma que bacias de variados tamanhos se articulam a partir dos divisores de drenagem principais e drenam em direção a um canal principal (que pode ser também tronco ou coletor principal), formando, assim, um sistema de drenagem hierarquicamente organizado.

Ambientalmente, o conceito de bacia hidrográfica percorre um viés de múltiplas escalas, abrangendo parâmetros de geodiversidade, vulnerabilidade e uso da terra. Assim, não se trata apenas de uma unidade ligada ao recurso hídrico, mas sim de uma delimitação correspondente a ações humanas, impactos naturais e diversas outras interações entre sociedade e natureza.

A análise de parâmetros de vulnerabilidade, fragilidade e risco, relacionados ao uso da água, cabe à unidade bacia hidrográfica, que tem a função de organizar a política de manutenção desse recurso para estados e/ou municípios dentro de seus limites. Acerca dessas delimitações, que vão ao encontro do estudo da BH, Bernardi *et al.* (2012, p. 165) expõe que:

> Muitas vezes as divisões das bacias hidrográficas não levam em consideração apenas aspectos físicos, mas também políticos. Essa definição vem sendo tratada como um equívoco, visto que as redes hidrográficas sobrepõem limites entre Estados. Sendo assim, existe uma preocupação em delimitar uma área hidrográfica sobrepondo às divisões políticas. O intuito é obter um melhor gerenciamento das águas pelo fato de trabalhar com toda a região coletora.

Caminhando nessa abordagem, tem-se a bacia hidrográfica como uma unidade de planejamento ambiental, que Pires, Santos e Del Prette (2002 p. 17) destacam que:

> O conceito de Bacia Hidrográfica (BH) tem sido cada vez mais expandido e utilizado como unidade de gestão da paisagem na área de planejamento ambiental. Na perspectiva de um estudo hidrológico, o conceito de BH envolve explicitamente o conjunto de terras drenadas por um corpo d'água principal e seus afluentes e representa a unidade mais apropriada para o estudo qualitativo e quantitativo do recurso água e dos fluxos de sedimentos e nutrientes. Embora tecnicamente o conceito implícito no termo seja preciso, podem existir variações no foco principal, conforme a percepção dos técnicos que o utilizam em seus estudos.

Assim, o estudo inteiramente relacionado às bacias hidrográficas não deve se restringir à análise dos parâmetros hídricos, mas sim a todo um viés geoambiental, considerando os impactos antrópicos provenientes dos múltiplos usos da terra, principalmente em meios rurais, que correspondem a um elevado percentual das bacias de grande escala.

> Significativo percentual das áreas das bacias hidrográficas é constituído por espaço rural, pois as atividades agropecuárias são aquelas que ocupam maiores extensões de espaço geográfico. Os impactos gerados por essas atividades são de natureza tipicamente difusa, mas a utilização de uma bacia hidrográfica como unidade de estudo permite a pontualização desses problemas, tornando mais fácil a identificação de focos de degradação ambiental instalados e o grau de comprometimento da produção sustentada. Assim, a bacia hidrográfica torna-se a unidade de trabalho ideal para o planejamento de exploração que contemple a integração de recursos naturais e aspectos socioeconômicos, dentro de uma perspectiva de renda para o agricultor e de preservação ambiental (Santana, 2003, p. 10).

Tendo em vista as reflexões apresentadas por diversos autores e as peculiaridades da área de estudo, considerou-se, para o conceito de bacia hidrográfica, sua hierarquia e área. Apesar disso, a bacia hidrográfica do Rio Pindaré, para o presente estudo, abrange múltiplas análises que não contemplam somente parâmetros hídricos, mas também todo o componente ambiental e antrópico que está presente na paisagem. Essa análise não parte apenas de um diagnóstico quantitativo dos elementos encontrados, mas sim em toda a dinâmica ocorrente, a fim de entender os diversos ciclos.

## 2.2 Análise da paisagem em bacias hidrográficas

De modo geral, a categoria 'paisagem' se caracteriza como uma das mais conceituadas em relação à terminologia. Tanto no senso comum quanto nos meios científicos, o conceito de paisagem recebe nomenclaturas que, muitas vezes, não entram em consenso. Originado no século XVI, etimologicamente, o termo remonta às línguas românicas, derivando do latim

(*pagus*, que significa país) (Soares, 2021), sendo representado desde a antiguidade. Associada diretamente ao meio estético, a ideia de paisagem se mostra ao meio antrópico antes mesmo de sua conceituação, com o seu entendimento já correlacionado e encontrado nas artes e nas ciências de diversas culturas espalhadas pelo mundo, retratado, inicialmente, por meio de pinturas rupestres, animais selvagens, montanhas e rios (Maximiano, 2004).

Na IV dinastia egípcia, os jardins ornamentados, que incluíam água, varandas, pavilhões e celeiros, formavam um complexo residencial (2500 a.C.) (Maximiano, 2004).

Na Mesopotâmia, a correlação entre a sociedade e a paisagem se mostrava explícita, desde a observação das estrelas até o meio organizacional e econômico, a partir da elaboração de leis e conhecimentos na agricultura. Além disso, a construção de oásis nas cidades fortificadas demonstrava a preocupação com fator estético dessa sociedade (Maximiano, 2004).

Os Assírios, com a construção de parques de caça e oásis, também remontam essa percepção da paisagem, juntamente com os romanos, com a criação de parques públicos, jardins, construções arquitetônicas, entre muitos outros (Maximiano, 2004).

Assim, a ideia de paisagem está atrelada a diversas sociedades desde a antiguidade. A noção de paisagem, nesse contexto, já era uma realidade, entretanto, suas premissas históricas podem ser vistas a partir do Renascimento Cultural no século XV, com a pintura revelando um interesse pela natureza (Silveira, 2009). Dessa forma, sua consciência e o prelúdio da terminologia se iniciaram com "concreto no mundo ocidental: escritos de Montaigne, a partir de sua viagem à Itália no século XVII, e aquarelas do holandês Albrecht Dürer, produzidas em sua viagem aos Alpes austro-italianos, de 1495 a 1505" (Maximiano, 2004, p. 85).

> Na herança do Renascimento, com sua estética romântica naturalista, a paisagem ocupa lugar na Geografia, quando esta se constitui como ciência, no século XIX, através de geógrafos alemães e franceses. As obras "Cosmos" de Alexander Von Humboldt e a "Antropogeografia" de Friederich Ratzel são exemplos de clássicos onde o conceito de paisagem é inserido e foi utilizado como método de análise e entendimento da superfície terrestre (Silveira, 2009 p. 6).

A escola alemã, ou germânica, pode, assim, ser considerada a propulsora do estudo da paisagem na geografia, a partir da qual se tem a sistematização da ciência geográfica, com as abordagens pioneiras de Alexander von Humboldt e Karl Ritter, baseadas no estudo naturalista e viagens feitas ao redor do mundo, sendo estas documentadas (Barbosa; Gonçalves, 2014).

> É somente na geografia alemã, que a paisagem ganha um caráter científico, partindo das concepções paisagísticas de Humboldt, para a tipologia das formas proposta por Grisebach, em um resumo global sobre as formações vegetais existentes no globo que levariam à uma diferenciação fisionômica da paisagem, além da visão holística da natureza proposta por Kant e Ritter (Passos, 2003 *apud* Gonçalves; Passos, 2020, p. 34).

A escola alemã, sob uma visão geográfica, desenvolve novos conceitos de paisagem, relacionando-os a métodos cartográficos geomorfológicos. Ademais, introduz o conceito de paisagem como uma categoria científica, estando associado, até 1940, a fatores naturais e humanos (Maciel; Lima, 2011).

Humboldt, com sua visão holística da paisagem, proporciona a correlação entre o meio natural e a ação antrópica, sistematizando a ciência geográfica (Schier, 2003). "Humboldt apresentava um viés mais naturalista, sob forte influência no kantismo, onde o conhecimento geográfico era tido como uma síntese das demais ciências, buscando a conexão entre os elementos naturais, baseados no método empírico" (Gonçalves; Passos, 2020, p. 32). Atrelado a isso, as abordagens propostas pela escola germânica corroboraram para o início da categoria paisagem, que logo depois acarretaria uma conceituação por parte de diversos autores de outros países. A ciência da paisagem ingressou na geografia alemã, seguindo duas direções: a primeira, uma abordagem naturalista, foi denominada de paisagem natural (*Naturlandschaft*), e a segunda, com foco no meio cultural, foi denominada paisagem cultural *(Kulturlandschaft)* (Barbosa; Gonçalves, 2014).

Para Schier (2003), a obra de Carl Ritter, denominada "Geografia Comparada", trouxe para a geografia não somente células do positivismo dinâmico histórico, mas também uma ciência enciclopédica; onde Ritter, comparado a Humboldt, não interpreta a paisagem como seu objeto de estudo principal, mas sim de análises regionais como ambiente amostral para a determinação de características que ocorrem em diversas regiões.

Também se diferenciando de Humboldt, Friedrich Ratzel, em sua obra "Antropogeografia", introduz o conceito de paisagem ligado a um meio antropogênico, evidenciando um distanciamento do espírito humano de seu meio natural. Ratzel descreve uma dialética entre elementos fixos – pertencentes à paisagem natural –, e elementos móveis, correspondentes a fatores antrópicos. Esse distanciamento corrobora para a libertação do meio cultural do natural (Schier, 2003). Assim, Friedrich Ratzel "não destaca a paisagem como uma forma local e delimitada, que exerce uma influência direta na sua cultura, mas utiliza o termo em forma genérica, misturando-o com o termo 'terra'" (Schier, 2003, p. 82).

> Ratzel publicou suas obras no último quartel do século XIX, durante as primeiras décadas da constituição real do Estado nacional alemão. Sua obra foi um instrumento poderoso frente aos desejos expansionistas do Estado alemão recém-constituído. Pela natureza de seus estudos pautados nas relações sociais, Ratzel é considerado o criador da Geografia Humana e da Geopolítica (Gonçalves; Passos, 2020, p. 34).

Embora Ratzel não tenha incorporado a paisagem como o clímax de sua atuação na geografia, ele proporcionou contribuições ao determinismo geográfico, influenciando, assim, outros autores da geografia que, posteriormente, definiram tal conceituação como uma linha de pensamento, na qual o homem seria o produto do meio e a natureza teria o papel de conduzir todas as ações sobre o ser biológico (Gonçalves; Passos, 2020).

Já a escola russa, também denominada de antiga escola soviética, trouxe uma nova abordagem à temática da paisagem. Considerada uma escola cientificamente fechada, ela apresenta a perspectiva dos elementos da natureza, incluindo os processos físicos, químicos e bióticos; a vegetação como diferenciadora nos tipos de unidades de paisagem; e o solo como o resultado da interação entre o relevo, o clima e a vegetação (Maciel; Lima, 2011).

Na década de 60, Sotchava ratifica a escola soviética como focada em ações teórico-metodológicas, trazendo os primeiros estudos sobre os sistemas do ambiente. Partindo da Teoria Geral dos Sistemas, denomina a paisagem como um sistema interligado e organizado, com influência socioeconômica. A partir de 1963, Sotchava passa a chamá-la de "Geossistema", sendo este um pressuposto metodológico base nos estudos ambientais (Sotchava, 1977 *apud* Amorim, 2012).

> Para Sotchava, a paisagem/geossistema é vista como um sistema ou conjunto dinâmico de elementos inter-relacionados, fator este que implantou as bases da renovação dos estudos físico-geográficos-ambientais e deu os subsídios para a análise holística multidisciplinar do meio ambiente, formadas por fenômenos naturais, embora todas as ações econômicas e sociais afetem as suas peculiaridades espaciais (Pereira, 2017, p. 22).

Segundo Maciel e Lima (2011), quando Sotchava apresentou o termo 'geossistema', esclareceu que a natureza passa a ser entendida não somente por elementos, mas sim por meio das conexões entre eles, sendo a divisão morfológica da paisagem e suas subdivisões predominantes no estudo da dinâmica e sua cadeia estrutural.

A escola soviética contribuiu para o desenvolvimento do conceito de paisagem a diversos outros autores de múltiplas nacionalidades. O geossistema, especificamente, compreende a interação entre a escola soviética e a francesa, cujos principais nomes são Paul Vidal de La Blache, Georges Bertrand e Jean Tricart.

A escola francesa tem Paul Vidal de La Blache como figura importante no entendimento da geografia na França. Abrangente dos ideais da escola alemã, a escola francesa encontra-se inicialmente em processo de contestação dessa linha de pensamento, a partir da derrota da França na guerra contra a Prússia (Gonçalves; Passos, 2020). La Blache idealiza elementos básicos na organização e desenvolvimento dos estudos voltados à geografia, sendo estes as

características dos pays e regiões, assim como os componentes da natureza e os originários das atividades humanas (virada do século XX) (Christofoletti, 1999 *apud* Maciel; Lima, 2011).

Outro precursor da geografia francesa foi Georges Bertrand, com sua discussão sobre o geossistema. Para Bertrand, os geossistemas compreendem uma categoria concreta do espaço, na qual há uma interligação entre a ação antrópica, a exploração biológica e o potencial ecológico. Assim, para ele, a ação antrópica é um integrante dos geossistemas, enquanto para Sotchava, o fator ação antrópica é externo e modificador dos elementos do meio natural (Amorim, 2012).

Atrelado à discussão sobre a importância da geomorfologia na ordenação da paisagem, Jean Tricart parte do pressuposto do modelo de geossistema de Bertrand, com foco no potencial ecológico. Segundo Tricart (1977), as unidades de paisagem são compostas por três meios: os estáveis, os intergrades e os fortemente instáveis.

Tais situações propostas por Tricart (1977) expõem uma perspectiva do clímax de estado dos elementos da paisagem, associando-os à aptidão desses para reverter estados degradantes ocasionados por eventos impactantes. Fatores geoamabientais serão entendidos aqui como elementos determinantes do estado de estabilidade/vulnerabilidade das unidades de paisagem, sendo os componentes que as caracterizam como indicadores do clímax do ambiente.

Segundo Tricart (1977), uma cobertura vegetal densa e alinhada, uma fraca intensidade de dissecação, além da ausência de manifestações vulcânicas, compreende os meios estáveis das unidades de paisagem, sendo estes caracterizados como estabilizadores da mecânica de morfogênese. Os meios intergrades, como o equilíbrio permanente da morfogênese e pedogênese, por serem considerados delicados e suscetíveis a fenômenos de ampliação, correspondem a um balanço que pode inclinar-se para meios instáveis em relação ao ambiente.

O mesmo autor integra o estado de vulnerabilidade aos meios fortemente instáveis, onde condições climáticas abruptas, supressão da cobertura vegetal, deformações tectônicas, dissecação de áreas elevadas, além da degradação antrópica, são fatores que interferem diretamente na dinâmica das unidades de paisagem, favorecendo possíveis eventos catastróficos (Tricart, 1977). Nesse sentido, a análise da dinâmica da paisagem, na perspectiva do autor citado, deve englobar o estado atual desses componentes como fatores indicativos.

Assim, esta pesquisa parte dos pressupostos metodológicos e teóricos da Ecodinâmica de Tricart (1977), visando entender o meio ambiente de um ecossistema a partir da perspectiva da estabilidade e vulnerabilidade dos fatores ambientais e antrópicos que compõem as unidades de paisagem, sendo eles a geologia, o solo, o relevo, o clima e o uso e cobertura da terra.

## 2.3 Vulnerabilidade ambiental em bacias hidrográficas

Conceitualmente, o termo vulnerabilidade, na etimologia da geociência, condiciona o estado de um indivíduo, local e/ou objeto que se encontra em estado vulnerável, sendo o conceito de ‘vulnerável’ associado a algo frágil, que provavelmente tende a ser impactado. Este conceito, de modo geral, pode estar atrelado a múltiplas áreas do conhecimento humano, podendo definir uma ação que se seguirá.

Quando algo se encontra em estado de vulnerabilidade, ele é sempre associado à condição de portador de pontos de fraqueza, onde tais pontos, independentemente da área, definirão esse estado. Em um conflito armado, por exemplo, flancos cercados por soldados rivais tendem a ser pontos de fragilidade de um dos exércitos combatentes e, caso não haja nenhum método de intervenção, resultará em derrota. No corpo humano, esses pontos de fragilidade podem se manifestar na forma de sintomas, indicando uma possível enfermidade, que sem tratamento, pode agravar o estado de saúde do paciente ou até levar à óbito.

Aquino, Paletta e Almeida (2017a, p. 15) colocam frente a frente dois conceitos diferentes, mas que em muito se assemelham: o risco e a vulnerabilidade. Os riscos abrangidos pelos autores, acrescentado como risco ambiental, correspondem a um determinado evento, de magnitude proporcional, esperado ou não, que ocorre em um sistema, perturbando seu estado anterior. Já a vulnerabilidade, é definida como o grau em que um sistema natural é suscetível ou incapaz de lidar com os efeitos das interações externas, sejam estas naturais ou antrópicas. Assim, ambos os conceitos tendem a ser interpretados com base em possíveis acontecimentos, fundamentados na constatação de características presentes. Nesse contexto, o risco abrangerá a probabilidade desse determinado evento ocorrer, enquanto a vulnerabilidade apresentará indicadores, ou seja, o quão perturbado determinado ambiente se encontra, revelando seu estado de alterações de origem ambiental e/ou antrópica.

Segundo Santos e Soares (2020), no processo de construção teórico-conceitual da vulnerabilidade, diversas dimensões e termos foram empregados para defini-la, sendo eles: fragilidade, risco, susceptibilidade, perigo, exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa ou de resposta. Conforme os mesmos autores supracitados, além da inserção dessas terminologias, “há uma diversidade de enfoques de estudo, dentre os quais: vulnerabilidade ambiental, natural, social e socioambiental, assim como métodos e índices para mesurar e representar cartograficamente o grau de vulnerabilidade” (Santos; Soares, 2020, p. 86).

Apesar disso, os termos não possuem concordância entre os autores. Sobre o conceito de vulnerabilidade, têm-se as seguintes compreensões: Li *et al.* (2006 *apud* Figueirêdo, 2010)

relacionaram a vulnerabilidade às características do meio físico e biótico (declividade, altitude, temperatura, aridez, vegetação, solo), à exposição a fontes de pressão ambiental (densidade populacional, uso da terra) e à ocorrência de impactos ambientais (erosão hídrica) em uma área montanhosa. Nesse contexto, a análise da vulnerabilidade ambiental corresponde a parâmetros físicos e de geodiversidade suscetíveis a perturbações causadas por agentes antrópicos, como o tipo de uso, o escoamento superficial em áreas urbanas, entre outros.

Para Tagliani (2003), a vulnerabilidade ambiental é caracterizada como a maior ou menor susceptibilidade de um ambiente a um impacto potencial provocado por um uso antrópico qualquer. O mesmo autor afirma que a vulnerabilidade é avaliada segundo três critérios: fragilidade estrutural intrínseca, sensibilidade e o grau de maturidade dos ecossistemas.

> A vulnerabilidade ou fragilidade ambiental está relacionada com a susceptibilidade de uma área em sofrer danos quando submetida a uma determinada ação, sendo no caso em estudo, à ação do aporte de nutrientes num corpo d'água. Quanto maior a vulnerabilidade da bacia, menor a chance de recuperação do ambiente. Conhecer a vulnerabilidade de uma área a determinados fatores de pressão ambiental auxilia na priorização de investimentos públicos, normalmente escassos, em diferentes regiões (Figueirêdo *et. al.*, 2007, p. 400).

O termo fragilidade ambiental, muitas vezes associado à vulnerabilidade, é um dos conceitos ligados à ideia de um possível acontecimento ou desastre, considerando múltiplos indicadores que fomentam tal diagnóstico.

Alguns autores são referência no estudo da fragilidade, entre os quais Ross (1994). De acordo com o autor mencionado, a fragilidade dos ambientes naturais frente às interferências humanas é maior ou menor em função de suas características genéticas; sendo o meio natural, com exceção de alguns ambientes, detentor da estabilidade até a intervenção antrópica com o processo de extração dos recursos naturais (Ross, 1994).

Dentro dessa questão, Ross (1994) expõe que, na perspectiva do planejamento econômico e ambiental, seja em qualquer escala governamental ou até mesmo em bacias hidrográficas, é de grande necessidade que essas interferências antrópicas tenham objetivos claros de ordenamento territorial, baseando-se nos princípios da potencialidade dos recursos naturais e humanos, além das fragilidades dos ambientes.

Assim, o autor afirma que os trabalhos acerca da fragilidade, realizados a partir da produção de mapas e textos, são de grande importância ao Planejamento Ambiental, especialmente quando se objetiva o desenvolvimento sustentável, no qual a conservação e a

recuperação de áreas impactadas caminhem em conjunto com o meio tecnológico, econômico e social (Ross, 1994).

Ademais, vários são os substantivos atribuídos a tais conceitos para melhor representá-los, sendo obtidos conforme o ambiente para o qual se almeja um determinado diagnóstico. Dessa forma, Kawakubo *et. al.* (2005) abrange o termo fragilidade do solo, também conhecido como erodibilidade, que corresponde à vulnerabilidade do solo à erosão. Assim, as diferenças nos atributos físicos e químicos podem elucidar o fato de alguns solos erodirem mais do que outros, mesmo sob a mesma exposição em relação à condição do ambiente.

Outros termos atribuídos à ideia de fragilidade são a fragilidade potencial e a fragilidade natural, sendo que a primeira corresponde à vulnerabilidade natural do ambiente, e a segunda, à vulnerabilidade natural associada aos graus de proteção que os diferentes tipos de uso e cobertura vegetal exercem (Kawakubo *et. al*., 2005).

Também há outros conceitos associados à fragilidade, como a fragilidade potencial e fragilidade emergente, que, segundo Santos (2015), foram definidos a partir das limitações inerentes à ecodinâmica, conforme descrito por Ross (1994). Deste modo, Santos (2015, p. 77) afirma que as unidades de

> fragilidade potencial estão associadas aos ambientes estáveis que se encontram em condições de equilíbrio dinâmico, portanto, que foram menos afetados, em sua estrutura e funcionamento, pelas atividades humanas. Embora apresentem condições de ambientes estáveis, possuem instabilidade potencial qualitativamente previsível face as suas características naturais e ao desenvolvimento das atividades humanas.

A respeito da fragilidade emergente, o mesmo autor expõe que:

> Já as unidades de fragilidade emergente estão associadas aos ambientes fortemente instáveis, onde não se configuram as condições de equilíbrio dinâmico. Ainda que possam ser naturalmente frágeis, independentemente da ação humana, as unidades de fragilidade emergente mais comumente identificadas são aquelas cujas intervenções antropogênicas modificaram intensamente o ambiente natural (Santos, 2015, p. 77).

O risco é outro conceito associado à ideia de vulnerabilidade ambiental. O fato de ambos estarem correlacionados diz respeito ao conceito etimológico de risco, que é definido como uma ameaça, perigo ou probabilidade de determinado evento ocorrer, sendo que, no contexto ambiental, remeterá à semelhança com os demais termos.

O entendimento de risco, na maioria das vezes, está associado à sua percepção, considerando que a mesma determina as ações posteriores e, consequentemente, influenciando na aplicação de novas tecnologias (Aquino; Paletta; Almeida, 2017b).

Para Brüseke (1997 *apud* Dagnino; Carpi Junior, 2007), o risco ambiental não pode ser associado à predição de um evento X ou Y, pois não corresponde a um caminho de determinações que cheguem a uma previsão. Assim, a ideia de risco, no contexto ambiental, é descrita como um "alerta que mobiliza argumentativamente a imaginação de movimentos lineares que levam impreterivelmente à catástrofe, ou pelo menos, a um dano irreparável, se… Se nós não fizermos alguma coisa" (Brüseke, 1997 *apud* Dagnino; Carpi Junior, 2007, p. 56).

A partir de Rabelo (2003 *apud* Dagnino; Carpi Junior, 2007), tem-se a denominação 'risco natural', normalmente não associado a ações humanas, sendo definido pelo autor a partir das seguintes tipologias: riscos tectônicos e magmáticos; riscos climáticos; riscos geomorfológicos; e os riscos hidrológicos.

Porém, tal termo não deve ser confundido e tratado como um conjunto ou associação ao conceito de impacto ambiental. Brilhante (1999) faz essa diferença, expondo que um impacto pode ser positivo ou negativo, enquanto o efeito de um risco sempre será negativo e adverso, atrelado à ideia de probabilidade de o evento ocorrer.

Assim, o estudo do risco corresponde ao diagnóstico das probabilidades de ocorrência de eventos impactantes, existindo diversas teorias acerca das fases a serem seguidas, todas as quais avaliam os impactos, as probabilidades de ocorrência e os riscos envolvidos, e que podem levar à aquisição de dados informacionais acerca das ameaças concretas e as formas de controle da vulnerabilidade (Aquino; Paletta; Almeida, 2017b). Portanto, o risco ambiental pode ser entendido como uma forma de alerta, fomentado em argumentos de análise científica, atrelado principalmente a parâmetros sociais e econômicos.

## 2.4 Vulnerabilidade e elementos geoambientais

É fato que a vulnerabilidade corresponde a uma gama de fatores que serão definidos a partir de indicadores, os quais, muitas vezes, correspondem a elementos de cunho abiótico e geoambiental, também denominados de fatores de geodiversidade. Entende-se, a partir do conhecimento dos inúmeros indicadores que podem ser considerados elementos da vulnerabilidade, que um aglomerado de fatores, mesmo os mais importantes, não abrange todas as áreas de estudo e não são parâmetros comuns em todos os ambientes.

Uma alusão para se compreender melhor tal discussão é a revisão de um veículo automotivo, que não será feita desmontando e verificando cada peça, mas sim apenas os componentes principais, considerando diversas áreas de análise, como segurança, desempenho, durabilidade, entre outras.

Portanto, entre todos os elementos associados à vulnerabilidade, destacam-se os mais comuns, seguindo metodologias de autores como Crepani *et. al.* (2001) e Ross (1994), sendo esses parâmetros a geologia, que abrange desde as unidades litoestratigráficas, passando pelo grau de coesão das rochas até sua idade geológica; solos, considerando sua maturidade, porosidade e suscetibilidade; a geomorfologia, com inúmeras características a serem abordadas, ou seja, a declividade, a amplitude altimétrica, índice de dissecação do relevo, as unidades geomorfológicas; o próprio clima, com o índice pluviométrico; entre outros.

A geologia, nos termos científicos gerais, é a ciência que estuda a terra e as composições químicas das rochas. Porém, para a vulnerabilidade, a geologia é associada à interação do ambiente com suas unidades de análise, ou seja, características das rochas, idade, entre outros fatores. Nesse sentido, deve-se entender que todos os fatores alinhados à geologia serão passíveis de vulnerabilidade, podendo ou não impactar o ambiente no qual é identificado. Desse modo, a estrutura geológica, como um elemento indicador de estabilidade ou vulnerabilidade, é um fator de controle na evolução da superfície da Terra e pode se refletir em diversas características do ambiente natural (Bastos; Maia; Cordeiro, 2015).

Fatores como os tipos de rochas correspondem a elementos da geologia que podem acarretar vulnerabilidade. Rochas ígneas, associadas à análise da vulnerabilidade à perda do solo ou erosividade, são definidas como pouco vulneráveis, mesmo sendo extrusivas. Tal conclusão se dá devido ao nível de dureza e ao grau de resistência, sendo formadas, segundo Crepani *et. al.* (2001), a partir de material rochoso móvel, ocorrente na natureza, consistindo em uma fase líquida cuja composição é uma fusão de silicatos.

Seguindo a lógica de áreas, segundo o parâmetro litológico da geologia, também existem rochas mais passíveis de alta vulnerabilidade, associadas principalmente à pouca resistência à ação eólica e de drenagem, e principalmente, propensas a processos erosivos, nesse caso, as rochas sedimentares. Crepani *et. al.* (2001, p. 70) as associa a "materiais de que se compõem derivaram do intemperismo de rochas preexistentes". Assim, para o autor, a análise da vulnerabilidade geológica se dá a partir da vulnerabilidade à denudação das rochas, fazendo uma soma relativa e empírica dos fatores de intemperismo e erosão (Crepani *et. al.*, 2001).

A vulnerabilidade, de modo geral, é muito associada a processos erosivos lineares, com o fator clima como primordial para tais processos, posto que a intensidade pluviométrica, a temperatura e até mesmo o número de dias com chuva irão influenciar diretamente na erosividade. Para Ayoade (2006), elementos como o tempo e o clima são essenciais no campo das ciências ambientais, uma vez que influenciam diretamente a biosfera, hidrosfera e litosfera.

As variações de temperatura, intensidade de precipitação e ventos são alguns fatores que contribuirão para a energia cinética propensa à erosão hídrica (Weill; Pires Neto, 2007 *apud* Fushimi, 2016). Assim, o entendimento das ações proporcionadas por elementos naturais não influenciarão somente o meio externo antrópico (analisado a partir do geossistema de Sotchava), mas também os próprios componentes ambientais.

O relevo, assim como o clima, também apresenta tais correlações com os demais componentes geoambientais. Os estudos voltados para a morfologia terrestre têm sido alvo do interesse de muitos pesquisadores, principalmente a partir do século XX, quando a ação antrópica passou a gerar consequências aos sistemas naturais, sobretudo na alteração do relevo. Nessas pesquisas, pode-se observar esse processo (Silva, 2012).

A própria classe de solos tem originado características específicas que podem auxiliar nos processos de vulnerabilidade, principalmente na erosividade. Nesse sentido, Weill e Pires Neto (2007 *apud* Fushimi, 2016, p. 44) expõem que:

> Atributos como granulometria, estrutura e agregação dos horizontes superficiais, capacidade de infiltração e retenção de água no solo, permeabilidade ou velocidade de transmissão de água no perfil, teor de matéria orgânica e espessura ou profundidade estão associados à sua erodibilidade, isto é, maior ou menor resistência à manifestação erosiva.

Na análise da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, o uso dos elementos geoambientais se apresentará na forma de fatores, os quais representarão os indicadores de vulnerabilidade ou estabilidade da área de estudo. O uso e a cobertura da terra, apesar de um elemento misto do sistema natural com ações antrópicas é somado a esses elementos, sendo, nesta pesquisa, um fator de destaque pela complexidade na obtenção de pesos para classificá-lo de forma não homogênea.

Nessa perspectiva, com a atribuição de diversos conceitos de vulnerabilidade, além de múltiplos elementos de cunho ambiental e antrópico, o presente estudo compreenderá uma correlação entre tais fatores, de modo a entender as particularidades das unidades de paisagem. Essas singularidades permitem compreender uma vulnerabilidade mais ligada aos componentes físicos da paisagem, sendo estes os principais meios de influência dos eventos, caso vulneráveis, abrangendo principalmente a capacidade do ambiente de se recompor.

## 2.5 Uso e cobertura da terra: reflexões conceituais

Analisar o conjunto de termos que é o uso e cobertura da terra remonta a uma tarefa não tão simples, pois requer uma série de questionamentos que, muitas vezes, não terão uma resposta unânime.

> Os conceitos relativos ao uso da terra e cobertura da terra são muito próximos, por isso, muitas vezes são usados indistintamente. Cobertura da terra está diretamente associada com tipos de cobertura natural ou artificial, que é de fato o que as imagens de sensoriamento remoto são capazes de registrar. Imagens não registram atividades diretamente. Cabe ao interprete buscar as associações de reflectâncias, texturas, estruturas e padrões de formas para derivar informações acerca das atividades de uso, a partir do que é basicamente informações de cobertura da terra (Araújo Filho; Meneses; Sano, 2007, p. 172).

O termo ‘uso’, na língua portuguesa, é descrito como um substantivo masculino alinhado ao verbo ‘usar’, que remonta ao emprego, auxílio, utilização ou manuseio de determinado agente ou objeto como ferramenta. Tal conceito é rotineiramente apresentado no ramo geográfico, pois a ideia de interação entre sociedade e natureza parte do pressuposto de que o homem, como ser social, utiliza dos recursos naturais para fins específicos de sobrevivência. O rápido crescimento da população proporciona diversas demandas de recursos, e, portanto, visando cada vez mais terras produtivas, resultando na antropomorfização das áreas naturais, modificando e reestruturando a paisagem a sua volta – paisagens artificiais (antropomórficas) (Morais; Carvalho, 2013).

Esse acelerado processo de desenvolvimento da sociedade, responsável por tais modificações da superfície terrestre, exige que, com a mesma velocidade em que se processam essas transformações, haja uma elucidação sistemática das possíveis alterações decorrentes da interferência do homem sobre o ambiente (Leite; Rosa, 2012).

Com isso, entender esse processo a partir de uma perspectiva analítica, ou seja, como os elementos da paisagem estão estruturados e relacionados, é fundamental para a caracterização da cobertura do solo, como também para os tipos de usos antrópicos que interferem nesses sistemas, identificando e interpretando os usos e tipos de cobertura de uma região, além de contribuir para os estudos da paisagem em volta, sendo o caminho para compreender sua dinâmica espaço-temporal (Morais; Carvalho, 2013).

Dos parâmetros geoambientais, a cobertura vegetal é interpretada como um dos principais meios de modificação da paisagem. Desde os primórdios da sociedade, a vegetação é associada a uma “folha em branco”, tanto interpretada como um espaço livre que pode ser utilizado para diversas atividades (construção de moradias, cemitérios, agricultura e pecuária), como também para utilização de seus recursos, sendo ignorada como ambiente e habitat de inúmeras espécies da fauna e flora.

Todavia, entende-se que a cobertura vegetal corresponde a um importante elemento para a preservação dos recursos naturais, exercendo o papel de agente na manutenção do ciclo da água, protegendo o solo contra o impacto das gotas de chuva, aumentando a porosidade e a permeabilidade através da ação das raízes, assim como diminuindo o escoamento superficial e garantindo a umidade e a fertilidade no solo por meio da matéria orgânica (Beltrame, 1994 *apud* Costa; Ribeiro; Albuquerque, 2020).

A própria vulnerabilidade considera a cobertura vegetal como um dos indicadores para os diagnósticos de supressão da vegetação. Atividades de cunho agrícola e pecuário ratificam-se como usos atuantes nesse processo, e até mesmo fatores consequentes dessa presença podem influenciar na retirada da vegetação, tendo como exemplos as áreas de pastagem, a supressão da mata ciliar dos cursos d'água e, principalmente, a retirada da vegetação primária. Entretanto, buscar soluções alinhadas à contenção dessas atividades não deve ser a resposta, tendo em vista as atividades econômicas associadas ao país, como afirma Crepani *et. al.* (2001, p. 16), "no Brasil, e particularmente na Amazônia, a agricultura e a pecuária são as atividades mais importantes na introdução de estímulos externos, devido a seu caráter extensivo que envolve grandes áreas e busca sempre novas fronteiras".

O primeiro processo de intervenção das atividades de uso da terra no sistema de paisagem natural corresponde a alterações na cobertura vegetal, que acontecem na forma de retirada de matéria orgânica pelo desmatamento seguido de queimadas. A presença do solo exposto, causado pela supressão da vegetação pode desencadear um processo que, dependendo de seu nível, pode não ser absorvido pelo sistema, iniciando um reajustamento em busca de uma nova situação de equilíbrio, cujos efeitos são extremamente danosos aos seres vivos (Crepani *et. al.,* 2001).

Crepani *et. al.* (2001, p. 16) expõem que "a vida vegetal depende de boas condições de porosidade e permeabilidade do solo para respirar e se abastecer corretamente de água e de nutrientes, e estas condições dependem da 'grumosidade' do solo", sendo as diferentes formas de uso essenciais para a manutenção da biota. Fatores como o solo exposto são um dos grandes responsáveis pelo aumento de área com intenso processo de desertificação.

No meio especificamente rural, o solo exposto ocorre a partir de diferentes tipos de uso agrícola. Em áreas onde há o predomínio do campesinato, o sorgo (vegetação rasteira) é utilizado como agente inibidor da radiação solar. Sua ausência, atrelada ao pisoteio do gado, secas recorrentes e, principalmente, à supressão da vegetação, representa os principais causadores do solo exposto e, consequentemente, a infertilidade do solo.

O solo exposto, sem a proteção da cobertura vegetal, tem seus grumos desfeitos pelo impacto direto das gotas de chuva, ao mesmo tempo em que há uma diminuição da microvida devido à retirada de matéria orgânica e à exposição ao sol, interrompendo a formação de substâncias agregantes pela decomposição da matéria orgânica, como ácidos poliurônicos, que permitiriam a formação de novos grumos (Crepani *et. al.*, 2001).

A partir de tais discussões, conclui-se que o uso da terra, atrelado às modificações antrópicas, e a cobertura vegetal – sendo um parâmetro geoambiental passível de atenção –, tornam evidente a necessidade de análises que permitam compreender as diversas formas de utilização da terra, considerando o manejo e as práticas utilizadas nos respectivos ambientes.

Segundo Leite e Rosa (2012), o sensoriamento remoto é a resposta, uma vez que, para os mesmos autores, o produto gerado por essa ferramenta, obtido por sensores imageadores a bordo de satélites artificiais, proporciona um conhecimento atualizado do uso e da cobertura da Terra, constituindo-se, assim, uma importante ferramenta e subsídio à orientação e tomada de decisões.

O uso do mapa é de grande importância, pois esse meio servirá como uma síntese das características dispostas na realidade do uso e da cobertura da terra, onde estes "indicarão a distribuição espacial da tipologia da ação antrópica que pode ser identificada pelos seus padrões homogêneos característicos na superfície terrestre via análise em imagens remotamente sensoriadas" (Leite; Rosa, 2012, p. 91). O planejamento seguinte, juntamente com a orientação à ocupação da paisagem, será auxiliado por tais identificações e atualizações, o que, consequentemente, respeitará a capacidade dos parâmetros de estabilidade/vulnerabilidade. (Leite; Rosa, 2012). Assim, segundo Campos *et al.* (2004, p. 432):

> O sensoriamento remoto e o geoprocessamento constituem-se em técnicas fundamentais para a manutenção de registros do uso da terra ao longo do tempo. As imagens de satélite, em forma digital ou papel, são muito importantes e úteis, pois permitem avaliar as mudanças ocorridas na paisagem de uma região e num dado período, registrando a cobertura vegetal em cada momento.

A análise do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Rio Pindaré corresponde a um diagnóstico multitemporal. Para isso, o uso de dados provenientes de bancos como o Mapbiomas e o IBGE influenciará diretamente na universalidade e rapidez do processo de mapeamento, sem detrimento da qualidade da análise.

## 2.6 Geoprocessamento, sistema de informação geográfica e sensoriamento remoto

A geografia, assim como muitas ciências que têm na superfície da Terra seu objeto de estudo, necessita de tecnologias que supram as necessidades correspondentes ao que se quer responder. Segundo Medeiros (2016, p. 64), “com o aumento da tecnologia e a facilidade na utilização de ferramentas, tornou-se simples levantar um conjunto de dados referentes às bacias hidrográficas, sempre buscando uma conservação e melhor aproveitamento deste ambiente natural”.

Nesse contexto, surge o geoprocessamento, que em sua definição geral, corresponde a um conjunto de tecnologias nas quais se pode coletar e tratar informações pré-definidas e georreferenciadas, possibilitando múltiplos resultados diferentes. Rosa (2013) define geoprocessamento como tecnologias destinadas ao tratamento de informações espaciais, desenvolvendo novos sistemas e aplicações, e remetendo a profissionais que trabalham com cartografia digital, processamento digital de imagens e Sistemas de Informações Geográficas, que apesar da diferença, tem-se uma inter-relação.

A ideia do geoprocessamento caminha junto com a conceituação de desenvolvimento tecnológico, pois, a partir dos desenvolvimentos computacionais, houve a possibilidade de um maior armazenamento. Consequentemente, a dimensão dos bancos de dados passou de uma abundância de cartas-imagem analisadas manualmente para bancos de dados informacionais digitais, com o uso de softwares para mapeamento, facilitando trabalhos que levariam anos para serem analisados. Assim, Zaidan (2017, p. 198) afirma que:

> O geoprocessamento pode ser considerado como um ramo de atividades, e pode ser definido como o conjunto de técnicas e métodos teóricos e computacionais relacionados com a coleta, entrada, armazenamento, tratamento e processamento de dados, a fim de gerar novos dados e ou informações espaciais ou georreferenciadas. É importante observar que informações georreferenciadas têm como característica principal o atributo de localização, ou seja, estão ligadas a uma posição específica do globo terrestre por meio de suas coordenadas.

A utilização de computadores para o manuseio de dados em abundância levou ao desenvolvimento dos Sistemas de Informação, sendo definidos como uma junção de recursos humanos (Peopleware) e técnicos (Hardware/Software), em concordância com múltiplos procedimentos organizacionais que proporcionam informações com finalidade de apoiar as gestões diretivas (Rosa, 2013).

Nesse viés, entram as chamadas geotecnologias, que, segundo Zaidan (2017), correspondem a esse conjunto de ferramentas tecnológicas utilizadas para coleta, armazenamento, edição, processamento, análise e disponibilização de dados e informações com referência espacial geográfica. Dentro desse conjunto que são as geotecnologias, estão o

geoprocessamento, SIG (GIS, SGI) – Sistemas de Informações Geográficas, Cartografia Digital ou Automatizada, Sensoriamento Remoto por Satélites, Sistema de Posicionamento Global (tendo GPS como exemplo), Aerofotogrametria, Geodésia, Topografia Clássica, entre outros. O geoprocessamento, em si, entra na constituição desses Sistemas de Informações Geográficas – SIGs (Zaidan, 2017). Atualmente, algumas dessas geotecnologias representam não somente informações para análises multitemporais e de uso e ocupação, mas também como ferramentas de utilidade socioeconômica, como é o caso do GPS (Sistema de Posicionamento Global).

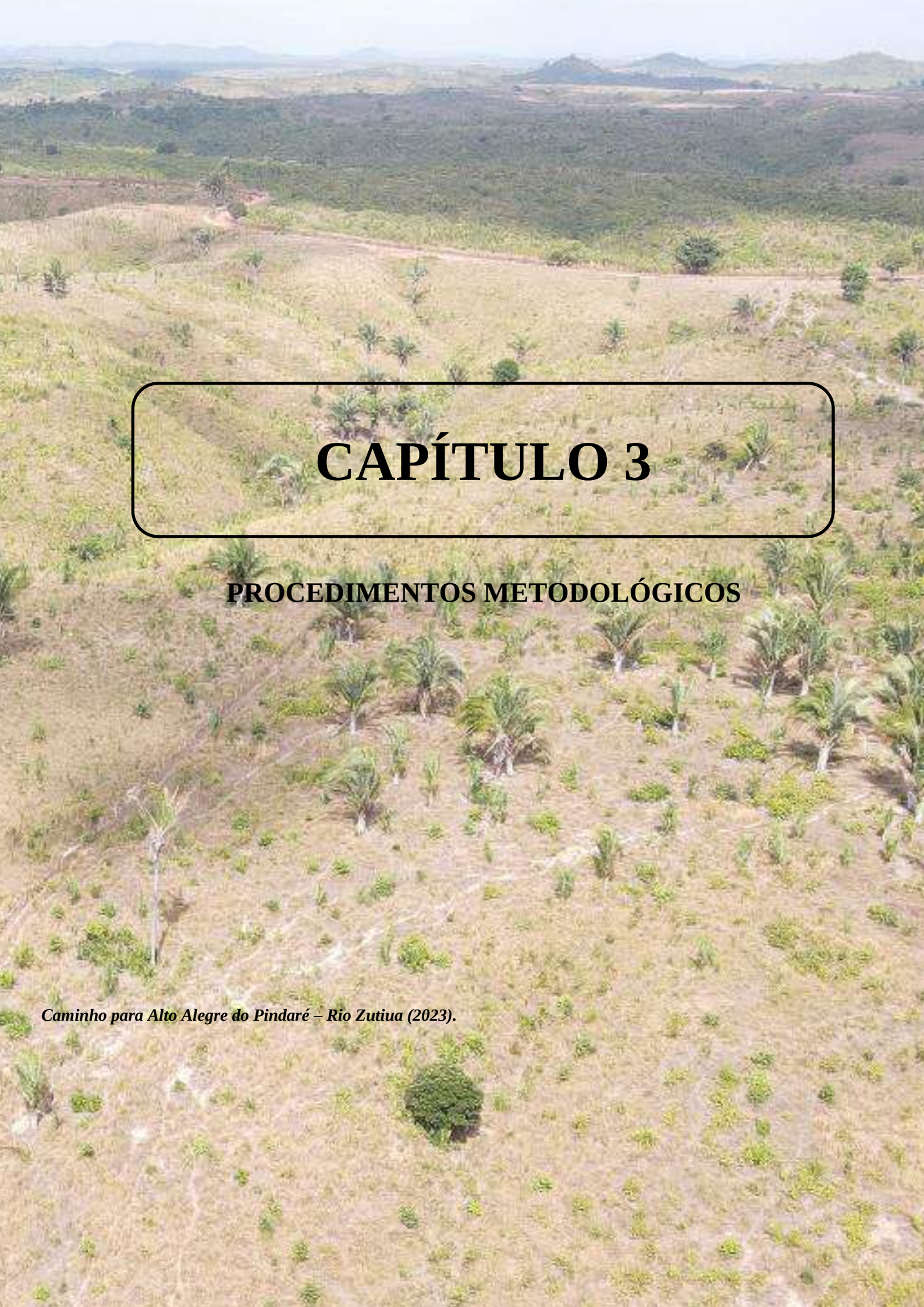
> O Sistema de Informação Geográfica (SIG) é um caso específico do Sistema de Informação. Seu desenvolvimento começou em meados da década de 60. O primeiro sistema a reunir as características de um SIG foi implementado no Canadá, em 1964, sendo chamado de "Canadian Geographic Information System". Em seguida foram desenvolvidos outros sistemas. Dentre eles podemos destacar os sistemas de New York Landuse and Natural Resources Information Systems (1967) e Minnesota Land Management Information System (1969). Nas décadas posteriores ocorreram consideráveis avanços em equipamentos e software, permitindo o desenvolvimento de sistemas mais potentes e novas aplicações, popularizando principalmente os CAD's (Computer Aided Design), cujos objetivos são diferentes dos SIG's. No começo da década de 80, a evolução da tecnologia foi afetada pelos avanços em hardware e software, com o uso mais efetivo na manipulação das informações geográficas, bem como a ligação entre a base de dados gráfica e alfanumérica (Rosa, 2013, p. 60).

Assim, o objetivo principal de um SIG é sua utilização como ferramenta para diversas áreas do conhecimento que utilizam mapas. Ele permite integrar em uma única base de dados diversas características informacionais de uma determinada área, inserir dados de diversas formas e realizar a correlação de dados, gerando novos dados e documentos informacionais de diversos tipos (relatórios, gráficos, entre outros) (Rosa, 2013).

O Qgis, software de utilização livre, é um dos SIGs mais utilizados atualmente no meio acadêmico, especialmente para análises ambientais, não apenas na geografia. Sua eficiência, disponibilidade e praticidade corroboram para um melhor gerenciamento de espacialização de dados, se mostrando essencial para a análise da bacia hidrográfica do Rio Pindaré.

# CAPÍTULO 3

## PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS



*Caminho para Alto Alegre do Pindaré – Rio Zutiua (2023).*

Quanto aos procedimentos metodológicos, esta pesquisa foi alinhada seguindo quatro etapas de execução. A primeira, em síntese, corresponde à obtenção de material informacional e teórico do parâmetro analisado; a segunda etapa envolve a espacialização dos elementos obtidos a partir de vetores, *rasters* e dados tabulados, que são posteriormente submetidos a contribuições e correções com base em trabalhos já realizados; a terceira etapa consiste, com os parâmetros geoambientais já obtidos, na atribuição de pesos às classes destes, seguindo características específicas para a obtenção da vulnerabilidade ambiental; a quarta e última etapa se baseia na obtenção e espacialização da vulnerabilidade ambiental, utilizando os pesos como parâmetro para a determinação da estabilidade e/ou instabilidade de determinado ambiente.

## I. Escalas Cartográficas

A bacia hidrográfica do Rio Pindaré abrange trinta e dois municípios da região oeste do Estado do Maranhão, sendo a escala regional inevitável nesse caso. Porém, considerando que o presente estudo tem o objetivo de disponibilizar uma escala cartográfica que se vincula ao nível exploratório e de reconhecimento, optou-se pela utilização das escalas de 1:250.000, que, segundo Santos (2004), supre tais objetivos.

## II. Softwares utilizados no mapeamento

Para a execução da pesquisa, foram utilizados *softwares* de Sistema de Informação Geográfica (SIG), como QGis e ArcGis 10® (Licença EFL999703439), além de Sistema de Posicionamento Global (GPS), câmera fotográfica, imagens de satélites e Modelos Digitais de Elevação.

É importante frisar que já existe um projeto maior em curso, que abrange a vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, financiado pela CAPES. Este serviu como suporte nesta pesquisa, uma vez que ambos estão vinculados metodologicamente à área de estudos – podendo, assim, fornecer assistência mútua nas análises da bacia.

Abaixo, o Quadro 1 apresenta um fluxograma que descreve as análises realizadas no decorrer desta pesquisa.

**Quadro 1** – Metodologias para elaboração das variáveis ambientais e seus respectivos pesos de vulnerabilidade para a bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA

| FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA METODOLÓGICA<br>O conceito de bacia hidrográfica como unidade de estudo;<br>Análise da paisagem em bacias hidrográficas;<br>Vulnerabilidade ambiental em bacias hidrográficas;<br>Vulnerabilidade e elementos geoambientais;<br>Uso e cobertura da terra: reflexões conceituais;<br>Geoprocessamento, sistema de informação geográfica e sensoriamento remoto | VARIÁVEIS AMBIENTAIS | | | METODOLOGIA | CRITÉRIO PARA ELABORAÇÃO DOS PESOS | OBJETIVO GERAL |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **GEOLOGIA** | | | • Crepani *et. al.* (2001) | • Denudação das rochas | **VULNERABILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PINDARÉ – MA** |
| | **PEDOLOGIA** | | | • Crepani *et. al.* (2001) | • Maturidade | |
| | **EROSIVIDADE** | **ENERGIA POTENCIAL PLUVIOMÉTRICA** | **INTENSIDADE PLUVIOMÉTRICA** | • Crepani, Medeiros e Palmeira (2004) | • Intensidade Pluviométrica | |
| | | **ENERGIA POTENCIAL EROSIVA DO RELEVO** | **DECLIVIDADE** | • Ross (1994);<br>• Crepani *et. al.* (2001); | • Variação de declividade | |
| | | | **DISSECAÇÃO HORIZONTAL** | • Ross (1994);<br>• Crepani *et. al.* (2001); | • Distanciamento dos interflúvios | |
| | | | **DISSECAÇÃO VERTICAL** | • Ross (1994);<br>• Crepani *et. al.* (2001); | • Aprofundamento da dissecação | |
| | **USO E COBERTURA DA TERRA** | | | • IBGE (2013) | • Formas de uso da terra;<br>• Cobertura vegetal | |

Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

## III. Inventário Geoambiental

Inicialmente, foram obtidos dados sobre geologia, solos e geomorfologia por meio de *downloads* oriundos da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Zoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia Legal, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos (IMESC). Posteriormente, os dados foram enviados para o ambiente de trabalho do Qgis, onde foi possível reprojetar e recortar os planos de informação para o limite da área de pesquisa.

No processo de mapeamento dos aspectos geoambientais, utilizou-se o relevo sombreado como plano de fundo nos mapas temáticos de geologia, geomorfologia e solos, a fim de ilustrar a fisionomia e textura do relevo da área-objeto. Esses dados foram obtidos no site do TOPODATA/INPE no endereço eletrônico: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>.

É importante mencionar que, no processo de mapeamento, as cores correspondentes às classes litoestratigráficas, de geomorfologia e de solos apresentaram certa homogeneidade visual, dificultando a diferenciação entre elas. Assim, optou-se pela utilização de uma paleta com cores diferentes para cada classe.

a) Mapa de geologia

No Processo de mapeamento das unidades litoestratigráficas da BHRPind, procedeu-se à realização de modificações dos dados vetoriais advindos da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, sendo adaptados a partir de observações feitas no ano de 2021. A partir disso, no grupo de pesquisa Geomorfologia e Mapeamento – GEOMAP, no ambiente de trabalho do ArcGIS 10®, realizou-se a reprojeção para o Datum SIRGAS 2000 – Zona 23S. Após o processo de reprojeção, utilizou-se a ferramenta ‘recortar’ para realizar o recorte da geologia nos limites da bacia, sendo a camada de entrada “geologia_” e a camada de saída “delimitação_BHRPind”. Por fim, realizou-se a categorização das unidades e a inserção das mesmas em um layout predefinido e universal. Utilizou-se, para o mapeamento da geologia, a escala de 1:250.000.

b) Mapa de solos

Quanto ao mapa de pedologia, este foi realizado a partir de dados do Zoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia Legal, utilizando-se das ferramentas de reprojeção para alteração do datum e 'recorte' para os limites da bacia hidrográfica do Rio Pindaré. Nesse processo, havia a opção de classificar as unidades de solos até o 2º nível categórico (que dispõe de uma maior facilidade por conta da sintetização). No entanto, optou-se pela classificação até o 3º nível categórico, buscando um maior detalhamento das classes de solo. Por fim, as unidades foram inseridas em um *layout* predefinido e universal, com a utilização da escala 1:250.000.

c) Mapa de geomorfologia

Quanto ao mapeamento da geomorfologia, os dados referentes às unidades geomorfológicas foram obtidos a partir do Banco de Dados de Informações Ambientais (BDIA), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), incluindo tanto arquivos *shapefiles* quanto arquivos textuais para a descrição. No ambiente do Qgis utilizou-se as ferramentas de 'reprojeção' para alteração do datum e 'recorte' para os limites da bacia hidrográfica do Rio Pindaré. Além disso, o relevo sombreado foi adicionado, bem como todos os elementos universais presentes no *layout* padrão. Utilizou-se, para o mapeamento da geomorfologia, a escala de 1:250.000.

d) Mapa de declividade

No processo de mapeamento da declividade, utilizou-se o algoritmo *slope* (declividade) pertencente ao GDAL (Biblioteca de Abstração de Dados Geoespaciais). Na execução do algoritmo, realizou-se a inserção do mosaico MDE na camada de entrada e marcação do indicador de declividade expressa em porcentagem. Após esse procedimento, seguiu-se para o processamento de reclassificação da declividade, tendo como orientação a classificação proposta pelo Manual Técnico de Geomorfologia proporcionado pelo IBGE (2009), no qual a declividade é dividida em cinco classes com intervalos distintos.

Após essa etapa, realizou-se a reclassificação por meio do algoritmo *r.reclass*[1] do GRASS GIS, no qual, na camada de entrada, inseriu-se o algoritmo da declividade obtida na fase anterior e, em seguida, as regras de reclassificação foram aplicadas por meio de arquivo do tipo texto (extensão .txt) (Tabela 1). Com esse procedimento concluído, iniciou-se a fase de

[1]Cria uma nova camada de mapa, cujos valores de categoria são baseados em uma reclassificação das categorias em uma camada de mapa *raster* existente.

recorte da declividade, empregando como camada máscara o limite da área de pesquisa. Após esses procedimentos, utilizou-se todos os elementos universais presentes no *layout* padrão, em escala de 1:250.000.

**Tabela 1** – Regras para reclassificação dos intervalos de declividade

| Regras de Reclassificação | Formas de Relevo | Declividade (%) |
|---|---|---|
| **0.0000 thru 3.0000 = 1** | Muito Fraca (Mfa) | 0-3 |
| **3.0001 thru 8.0000 = 2** | Fraca (Fa) | 3-8 |
| **8.0001 thru 20.0000 = 3** | Moderada (Mo) | 8-20 |
| **20.0001 thru 45.0000= 4** | Forte (Fo) | 20-45 |
| **45.0001 thru 150.0000= 5** | Muito Forte (Mfo) | 45-75 |

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2022).

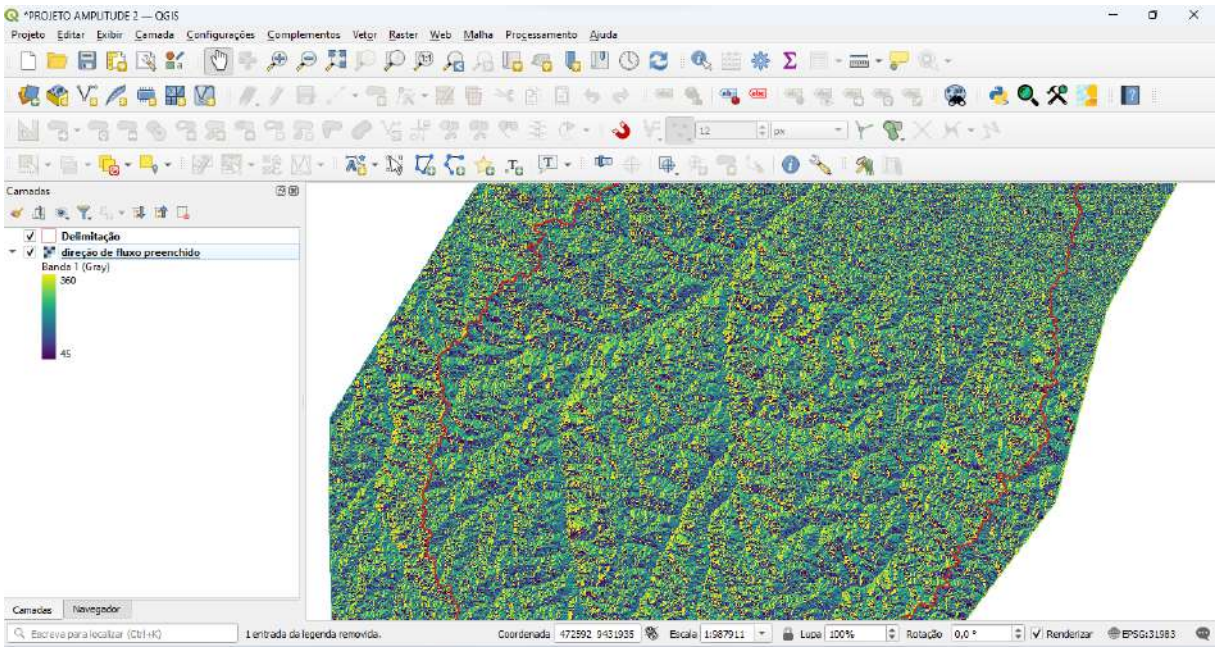
e) Mapa de dissecação do relevo

No processo de construção do mapa de índice de dissecação do relevo, consideraram-se, primeiramente, os parâmetros metodológicos a serem seguidos. Para este estudo, a análise da dissecação do relevo será realizada na perspectiva vertical e horizontal. Assim, o índice de dissecação do relevo representará a soma da dissecação horizontal, também denominada dimensão interfluvial ou densidade de drenagem, que representará a "dimensão que possui correlação direta com o conceito de dissecação propriamente dito, uma vez que mensura o afastamento horizontal médio de diferentes interflúvios de uma mesma unidade morfológica", e com a dissecação vertical, conhecida como grau de entalhamento, "medida que se refere à amplitude vertical do processo de dissecação" (Sampaio; Augustin, 2008, p. 3).

Para o processamento do IDR no *software* Qgis, seguiu-se o caminho metodológico proposto por Lima (2018), no qual, primeiramente, realizou-se a aquisição do Modelo Digital de Elevação (MDE) no Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil TOPODATA/INPE, utilizando-se das folhas 03S48_ZN, 03S465ZN, 04S48_ZN, 04S465ZN, 02S45_ZN, 05S465ZN e 05S48_ZN. Posteriormente, com a ferramenta *r.fill.dir*[2], realizou-se a aquisição do MDE sem depressão, o qual foi invertido por meio da calculadora *raster*. Com o MDE invertido, novamente com a ferramenta *r.fill.dir*, adquiriu-se a direção de fluxo ou *Flow Direction*, sendo que Lima (2018, p. 27) afirma que tal processo serve "para que o fluxo seja calculado em direção aos topos dos morros". Após isso, o uso da ferramenta 'preencher sem dados' para a correção e preenchimento das áreas que não apresentaram dados (Figura 2).

[2]Filtra e gera uma camada de elevação sem depressão e uma camada de direção de fluxo a partir de uma determinada camada raster de elevação.

**Figura 2** – Processamento da direção de fluxo na BHRPind




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2023).

Posteriormente, com o uso da ferramenta *r.watershed*[3], obteve-se as meias-bacias, com tamanho mínimo do exterior da bacia definido como 300, sendo este último arquivo gerado no formato *raster*, realizando-se sequencialmente a sua vetorização para o formato *shapefile*. Obtida tal camada vetorial, utilizou-se a ferramenta de estatísticas zonais sobre o MDE com a correção das depressões. Após essa execução, foi gerada uma coluna denominada "RANGE", a qual representará a Dissecação Vertical, ou Amplitude Altimétrica.

Para chegar à Dissecação Horizontal, inicialmente realizou-se os cálculos propostos por Lima (2018), começando pela obtenção da área e do perímetro dos interflúvios, ou meias-bacias. Em seguida, procedeu-se o cálculo do comprimento da bacia, representado pela equação: L=P/2, onde (L) representa o comprimento da bacia e (P) o perímetro. Realizado tal procedimento, partiu-se para a segunda equação, LM=A/L, onde (LM) representa a largura média, (A) a área da bacia e (L) o comprimento da bacia, sendo este valor denominado como Dissecação Horizontal.

Obtida a dissecação horizontal e a dissecação vertical, realizou-se a reclassificação de ambas de acordo com Ross (1994), utilizando a matriz dos índices de dissecação do relevo (Quadro 2) como regras de reclassificação para a DV (Grau de entalhamento) e a DH (Densidade de Drenagem ou Dimensão Interfluvial Média).

[3]Programa de análise de bacias hidrográficas.

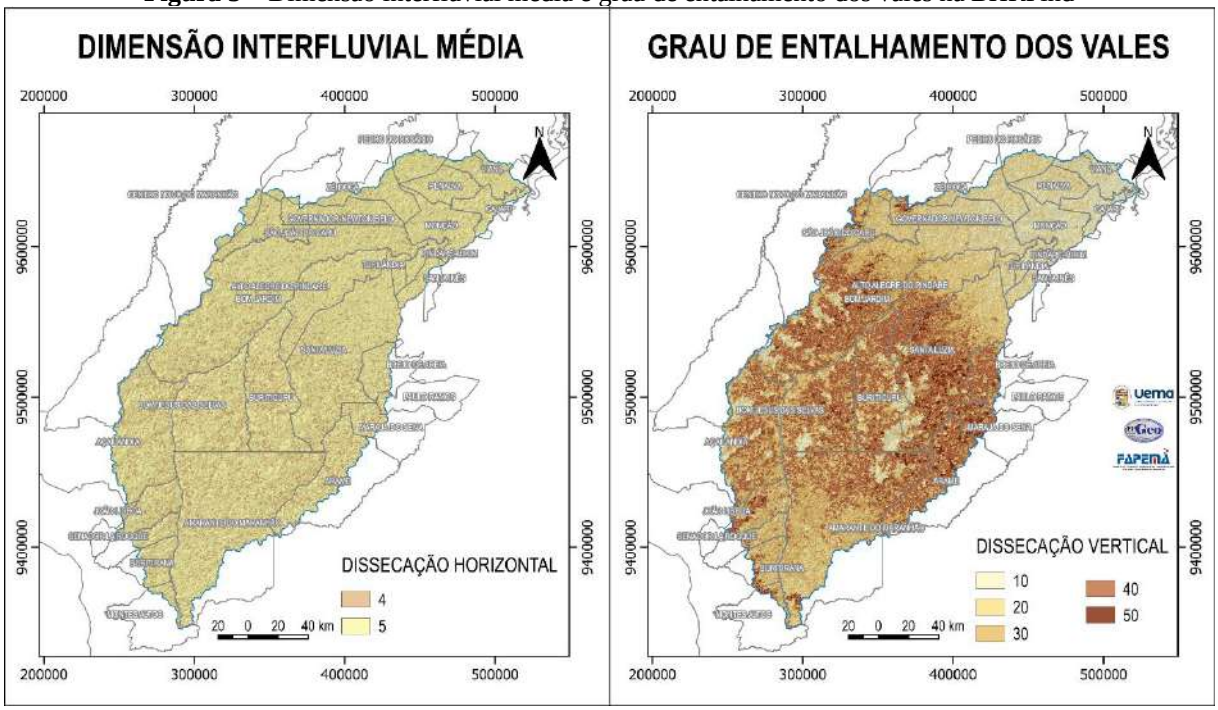
**Quadro 2** – Matriz dos índices de dissecação do relevo

| \ Densidade de Drenagem ou \ Dimensão Interfluvial \ Média (Classes) \ \ Graus de Entalhamento dos vales (Classes) \ | MUITO BAIXA (1) >3750m > 15 mm | BAIXA (2) 1750 a 3750m 3 a 15 mm | MÉDIA (3) 750 a 1750m 3 a 5 mm | ALTA (4) 250 750m 1 a 3 mm | MUITO ALTA (5) <250m 1 mm |
|---|---|---|---|---|---|
| Muito Fraco (1) (< de 20m) | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| Fraco (2) (20 a 40m) | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| Médio (3) (40 a 80m) | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 |
| Forte (4) (80 a 160m) | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 |
| Muito Forte (5) (> 160m) | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 |

Fonte: Ross (1994).

A criação do índice de dissecação do relevo partiu da soma da dissecação vertical com a horizontal (IDR=DV+DH). Classificando-os individualmente (DH, dimensão interfluvial média; e a DV, grau de entalhamento dos vales), conforme Guimarães *et. al.* (2017, p. 161), baseado em Ross (1994), "a dimensão interfluvial média é segmentado da seguinte forma: 0 a 250 m (5); 250 a 750 m (4); e o grau de entalhamento dos vales é segmentado da seguinte forma: 0 a 20 m (10); 20 a 40 m (20); 40 a 80 m (30); 80 a 160 m (40); > que 160 (50)" (Figura 3).

**Figura 3** – Dimensão interfluvial média e grau de entalhamento dos vales na BHRPind




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2023).

Posteriormente, para a classificação do índice de dissecação do relevo, foi submetida a proposta alternativa 3 de classificação da dissecação feita por Ross, sugerida por Guimarães *et. al.* (2017) (Figura 4).

**Figura 4** – Proposta alternativa 3 para classificação do índice de dissecação do relevo na BHRPind

Fonte: Guimarães *et. al.* (2017).

Após tais procedimentos para a obtenção do índice de dissecação do relevo, utilizou-se todos os elementos universais presentes no *layout* padrão para obtenção do mapeamento da dissecação do relevo em escala de 1:250.000.

f) Mapas de intensidade pluviométrica

Para a construção dos mapas de intensidade pluviométrica dos anos de 1991, 2001, 2011 e 2021, utilizou-se a ferramenta ‘camada de texto delimitado’. Primeiramente, é realizada a obtenção dos dados junto ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2023), referentes à precipitação total mensal e ao número de dias com precipitação pluvial mensal, das estações convencionais próximas ao limite da bacia, a saber: Barra do Corda (82571), Imperatriz (82564) e Zé Doca (82376). Posteriormente, realizou-se a tabulação dos dados em planilha, obtendo-se, a partir da equação proposta por Crepani, Medeiros e Palmeira (2004), a intensidade pluviométrica:

$$\text{Intensidade Pluviométrica} = \text{PMA} / (\text{NDC}/30)^4$$

Onde: PMA= Precipitação Média Anual; NDC= Número de dias com chuva.

Com objetivo de especializar as informações de intensidade pluviométrica, os dados tabulados em planilha, juntamente com as coordenadas das estações, geraram no Qgis uma camada de texto delimitado (CVS separado por vírgula), a qual foi salva em formato *shapefile*.

[4]O número de dias com chuva é transformado em meses, dividindo-se o seu total por 30.

Conseguinte, realizou-se uma interpolação IDW (Ponderação pelo Inverso da Distância) sobre o vetor gerado, que ocasionou a interpolação de uma camada de pontos vetoriais.

Obtidas as informações de intensidade pluviométrica, utilizou-se todos os elementos universais presentes no *layout* padrão para a obtenção do mapeamento da intensidade pluviométrica, com escala de 1:250.000.

## IV. Uso e cobertura da terra para análise da vulnerabilidade (1991 – 2021)

A fim de operacionalizar a caracterização do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Rio Pindaré ao longo de uma faixa temporal extensa, recorreu-se à utilização do Projeto MapBiomas.

O Projeto MapBiomas, Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil, originou-se de um seminário realizado em março de 2015, no qual especialistas nas áreas de sensoriamento remoto e mapeamento de vegetação reuniram-se para responder a seguinte pergunta: É possível produzir mapas anuais de uso e cobertura da terra para todo o Brasil de forma significativamente mais barata, rápida e atualizada, comparativamente aos métodos e práticas atuais, e que possibilitem recuperar o histórico das últimas décadas?

A resposta para essa pergunta foi afirmativa, “desde que houvesse uma capacidade de processamento sem precedentes e um alto grau de automatização do processo, além da participação de uma comunidade de especialistas em cada bioma e temas transversais” (Mapbiomas, 2019a).

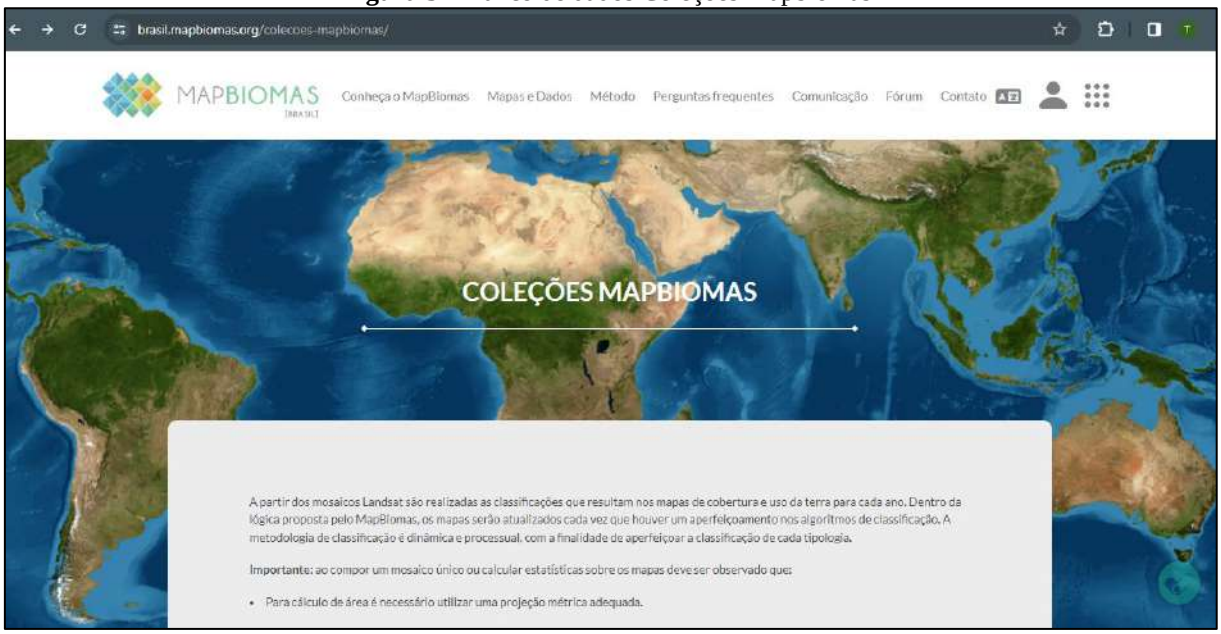
> Nesse contexto, foi estabelecido um contato com a Google que gerou um termo de cooperação técnica para desenvolver a iniciativa tendo como base a plataforma Google Earth Engine. Especificamente, o projeto teve início em julho de 2015 com um treinamento da equipe do MapBiomas sobre o Google Earth Engine em Mountain View, Califónia (Mapbiomas, 2019a).

O processamento de constatação do uso e cobertura da terra, em muitos anos, vem sendo feito a partir de métodos de classificação manual (com a vetorização individual das classes) e supervisionada (a partir da seleção de amostras), que apesar de exercerem certas particularidades, possuem limitações no que diz respeito aos diagnósticos de áreas com grande extensão, sendo uma das dificuldades a análise têmporo-espacial.

Para a caracterização do uso e cobertura da BHRPind, seguiu-se o caminho metodológico proposto por Borges e Oliveira (2021), utilizando dados da plataforma

MAPBIOMAS (2019b) <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?> (Figura 5) e do *Google Earth Engine.*

**Figura 5** – Banco de dados Coleções Mapbiomas




Fonte: Mapbiomas (2023).

Na obtenção das imagens de satélite *raster* do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, foi executado o *script* do *Google Earth Engine* na plataforma MAPBIOMAS para o Estado do Maranhão. Em seguida, foram selecionados os dados de uso e cobertura da terra para os anos de 1991, 2001, 2011 e 2021, realizando-se o *download* e tratamento das imagens. É importante frisar que, para esse procedimento, foi realizada a reprojeção dos dados para o sistema de coordenadas SIRGAS 2000 e projeção UTM Zona 23 S, sendo as imagens recortadas para os limites da bacia posteriormente. Consecutivamente, procedeu-se à classificação da simbologia do *raster*, utilizando o código de legenda para os valores de pixel na Coleção 7 do MapBiomas.

Quanto à discussão acerca do uso e cobertura da terra, foi realizada a interpretação levando em consideração as Áreas Preservação Permanente, Terras Indígenas, Unidades de Proteção Ambiental, entre outras áreas com aspectos legais que possam conservar e/ou preservar os remanescentes florestais. A escala utilizada para o mapeamento do uso e cobertura da terra foi a de 1:250.000, e para a normatização de acordo com os demais mapas, utilizou-se os elementos universais presentes no *layout* padrão.

## V. Análise e diagnóstico da vulnerabilidade ambiental

A análise dos graus de vulnerabilidade predominantes na bacia do Rio Pindaré será realizada a partir da metodologia proposta por Crepani *et al.* (2001), desenvolvida com base nos princípios da Ecodinâmica de Tricart (1977), que determinaram três tipos de meios tidos como unidades ambientais, sendo eles: meios estáveis, nos quais prevalece a pedogênese; meios intergrades, nos quais há equilíbrio entre pedogênese e morfogênese; e os fortemente instáveis, nos quais predomina a morfogênese.

Na análise morfodinâmica, serão atribuídos valores que variam de 1,0 a 3,0, totalizando 21 valores de vulnerabilidade nos quais as áreas podem ser enquadradas (Figura 6). Assim, nos cenários em que predomina os processos de pedogênese, são concedidos valores próximos de 1,0; nos cenários intermediários, valores em torno de 2,0; e em cenários de predomínio dos processos de morfogênese, valores próximos de 3,0.

Entretanto, seguindo a proposta de Crepani *et al.* (2001), visando atribuir um valor de vulnerabilidade a cada unidade de paisagem, será utilizada a seguinte equação:

Equação (1): V= (G+S+R+C+Uct) / 5.

Em que: V: vulnerabilidade; G: vulnerabilidade para o tema geologia; R: vulnerabilidade para o tema geomorfologia; S: vulnerabilidade para o tema solos; C: vulnerabilidade para o tema clima; Uct: vulnerabilidade para o tema uso e cobertura da terra.

É notório que, para cada área de estudo, há particularidades que devem ser preenchidas por adaptações, as quais, na análise da vulnerabilidade ambiental da bacia do Rio Pindaré, não devem ser diferentes, visando uma melhor aplicabilidade na área. Vale ressaltar que todo o processamento dos dados ocorrerá por meio da utilização dos SIGs Qgis e ArcGis 10®.

**Figura 6** – Metodologias e critérios para as distinções dos pesos

| UNIDADE DE PAISAGEM | MÉDIA | | | GRAU DE VULNERAB. | GRAU DE SATURAÇÃO | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | VERM. | VERDE | AZUL | CORES |
| U1 | | 3,0 | | VULNERÁVEL | 255 | 0 | 0 | |
| U2 | | 2,9 | | | 255 | 51 | 0 | |
| U3 | | 2,8 | | | 255 | 102 | 0 | |
| U4 | V | 2,7 | | | 255 | 153 | 0 | |
| U5 | U | 2,6 | | MODERADAM. VULNERÁVEL | 255 | 204 | 0 | |
| U6 | L | 2,5 | E | | 255 | 255 | 0 | |
| U7 | N | 2,4 | S | | 204 | 255 | 0 | |
| U8 | E | 2,3 | T | | 153 | 255 | 0 | |
| U9 | R | 2,2 | A | MEDIANAM. ESTÁVEL/ VULNERÁVEL | 102 | 255 | 0 | |
| U10 | A | 2,1 | B | | 51 | 255 | 0 | |
| U11 | B | 2,0 | I | | 0 | 255 | 0 | |
| U12 | I | 1,9 | L | | 0 | 255 | 51 | |
| U13 | L | 1,8 | I | | 0 | 255 | 102 | |
| U14 | I | 1,7 | D | MODERADAM. ESTÁVEL | 0 | 255 | 153 | |
| U15 | D | 1,6 | A | | 0 | 255 | 204 | |
| U16 | A | 1,5 | D | | 0 | 255 | 255 | |
| U17 | D | 1,4 | E | | 0 | 204 | 255 | |
| U18 | E | 1,3 | | ESTÁVEL | 0 | 153 | 255 | |
| U19 | | 1,2 | | | 0 | 102 | 255 | |
| U20 | | 1,1 | | | 0 | 51 | 255 | |
| U21 | | 1,0 | | | 0 | 0 | 255 | |

Fonte: Crepani *et al.* (2001).

Na obtenção das vulnerabilidades da bacia, iniciou-se a definição dos critérios (pesos) de estabilidade, equilíbrio ou vulnerabilidade. Para isso, recorreu-se novamente a Crepani *et. al.* (2001), que atribui pesos a cada plano de informação, de acordo com a vulnerabilidade de cada elemento à perda do solo ou atuação antrópica.

a) Vulnerabilidade Geológica

A criação do plano de informação da geologia baseou-se na perspectiva proposta por Crepani *et. al.* (2001) acerca da vulnerabilidade à denudação das rochas mais comuns (Tabela 2). Essa classificação serviu como um "norte" para a atribuição de pesos, uma vez que nem todas as rochas presentes na BHRPind possuem valor de peso na metodologia proposta pelo autor. Para o mapeamento, realizou-se uma síntese após a reclassificação do PI, de acordo com a figura 5, levando em consideração a homogeneização do grau de vulnerabilidade.

**Tabela 2** – Escala de vulnerabilidade à denudação das rochas mais comuns

| **Escala de vulnerabilidade à denudação das rochas mais comuns** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Quartzitos ou metaquartitos | 1,0 | Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita, Clorita xisto | 1,7 | Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos | 2,4 |
| Riólito, Granito, Dacito | 1,1 | Piroxenito,Anfibolito Kimberlito, Dunito | 1,8 | Conglomerados, Subgrauvacas | 2,5 |
| Granodiorito, Quartzo Diorito, Granulitos | 1,2 | Hornblenda, Tremolita, Actinolita xisto | 1,9 | Grauvacas, Arcózios | 2,6 |
| Migmatitos, Gnaisses | 1,3 | Estaurolita xisto, Xistos granatíferos | 2,0 | Siltitos, Argilitos | 2,7 |
| Fonólito, Nefelina Sienito, Traquito, Sienito | 1,4 | Filito, Metassiltito | 2,1 | Folhelhos | 2,8 |
| Andesito, Diorito, Basalto | 1,5 | Ardósia, Metargilito | 2,2 | Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos | 2,9 |
| Anortosito, Gabro, Peridotito | 1,6 | Mármores | 2,3 | Sedimentos Inconsolidados: Aluviões, Colúvios etc. | 3,0 |

Fonte: Crepani *et al.* (2001).

É importante destacar que a definição de vulnerável para unidades litoestratigráficas parte de um somatório de características que são comumente utilizadas como indicadores para se chegar a uma conclusão, ou seja, uma nota. Assim, visando tal consenso, utilizou-se as características litológicas de cada unidade como critério para atribuição de pesos, segundo Crepani *et. al.* (2001), realizando uma média aritmética entre ambas (Tabela 3).

Após tais procedimentos para a obtenção do fator geologia de vulnerabilidade, em escala de 1:250.000, todos os elementos universais presentes no *layout* padrão foram utilizados para seu mapeamento.

**Tabela 3** – Critério para atribuição de pesos (Geologia)

| Geologia | Critérios (litotipo) | Peso |
|---|---|---|
| C. Lateríticas Maturas | **Lateríta** (residual) | 2,0 |
| Depósitos Aluvinares | **Areia** (Sedimentos inconsolidados): **3,0**;<br>**Areia arcoseana** (Sedimentos inconsolidados): **3,0**;<br>**Argila** (Sedimentos inconsolidados): **3,0**;<br>**Cascalho** (Sedimentos inconsolidados): **3,0**;<br>**Conglomerado polimítico: 2,5**;<br>**Silte** (Sedimentos inconsolidados): **3,0**. | 2,9 |
| Formação Ipixuna | **Arenito: 2,4**;<br>**Argilito: 2,7**;<br>**Siltito: 2,7**. | 2,6 |
| Formação Itapecuru | **Arenito: 2,4**;<br>**Arenito arcoseano: 2,4**;<br>**Argilito: 2,7**;<br>**Folhelhos: 2,8**;<br>**Siltito: 2,7**. | 2,6 |
| Depósitos flúvio-lagunares | **Areia** (Sedimentos inconsolidados): **3,0**;<br>**Pelito: 2,7**. | 2,8 |
| Depósitos de pântanos e mangues | **Argila** (Sedimentos inconsolidados): **3,0**;<br>**Lama** (Sedimentos inconsolidados): **3,0**;<br>**Sedimentos siliclásticos** (Sedimentos inconsolidados): **3,0**;<br>**Silte** (Sedimentos inconsolidados): **3,0**;<br>**Turfa** (Sedimentos inconsolidados)**3,0**. | 3,0 |

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2022).

b) Vulnerabilidade Pedológica

Para a criação do plano de informação dos solos, ou seja, o fator solo de vulnerabilidade, em escala de 1:250.000, e considerando todos os elementos universais presentes no *layout* padrão, levou-se em consideração o grau de desenvolvimento ou maturidade do solo, utilizando diretamente pesos generalizados a cada especificação de classe, sendo que solos similares no 1º nível categórico, apesar da diferenciação no 2º e 3º, receberam notas iguais, segundo a proposta metodológica do autor (Tabela 4).

**Tabela 4** – Critério para atribuição de pesos (Solos)

| Solos | Vulnerabilidade |
|---|---|
| **Argissolos** | 2,0 |
| **Gleissolos** | 3,0 |
| **Latossolos** | 1,0 |
| **Luvissolos** | 2,0 |
| **Neossolos** | 3,0 |
| **Plintossolos** | 3,0 |

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2022), com base em Crepani *et. al.* (2001).

c) Vulnerabilidade Geomorfológica

Para a obtenção do fator geomorfologia, levou-se em consideração três parâmetros: amplitude altimétrica, também denominada grau de entalhamento; grau de dissecação, também de nomenclatura amplitude interfluvial; e a declividade. Assim, segundo Crepani *et. al.* (2001) a vulnerabilidade a geomorfologia é composta pela média entre tais componentes, onde R: Vulnerabilidade para o tema Geomorfologia, G: Vulnerabilidade atribuída ao Grau de Dissecação, A: Vulnerabilidade atribuída à Amplitude Altimétrica, e D: Vulnerabilidade atribuída à Declividade.

$$R= G + A + D/3$$

A amplitude altimétrica, em formas gerais, representa o aprofundamento da dissecação. Quanto maior a amplitude, maior será a energia potencial, considerando que as águas pluviais receberão maior energia cinética das partes mais altas do terreno para as partes mais baixas, e por consequência, causando erosão e morfogênese. Como parâmetro de classificação da vulnerabilidade para a amplitude altimétrica, utilizou-se a Tabela 5 como base para as regras de reclassificação.

**Tabela 5** – Valores de vulnerabilidade para a amplitude altimétrica

| **AMPLITUDE ALTIMÉTRICA (m)** | **V/E** | **AMPLITUDE ALTIMÉTRICA (m)** | **V/E** | **AMPLITUDE ALTIMÉTRICA (m)** | **V/E** |
|---|---|---|---|---|---|
| **<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** |

Fonte: Crepani *et al.* (2001).

O grau de dissecação, ou amplitude interfluvial, representa o distanciamento dos interflúvios, e sua vulnerabilidade será medida a partir desta distância, associada à intensidade da drenagem. Assim, bacias com maiores interflúvios ou com menor intensidade de drenagem apresentarão maior estabilidade, enquanto aquelas com menores interflúvios e maior intensidade de drenagem demonstrarão maior vulnerabilidade Crepani *et. al.* (2001).

A tabela 6 apresenta as regras de reclassificação realizadas para a obtenção da vulnerabilidade para o referido tema.

**Tabela 6** – Valores de vulnerabilidade para a amplitude interfluvial

| AMPLITUDE DO INTERFLÚVIO (m) | V/E | AMPLITUDE DO INTERFLÚVIO (m) | V/E | AMPLITUDE DO INTERFLÚVIO (m) | V/E |
|---|---|---|---|---|---|
| **>5000** | 1,0 | 3250 – 3500 | 1,7 | 1500 - 1750 | **2,4** |
| **4750 - 5000** | 1,1 | 3000 – 3250 | 1,8 | 1250 - 1500 | **2,5** |
| **4500 - 4750** | 1,2 | 2750 – 3000 | 1,9 | 1000 - 1250 | **2,6** |
| **4250 - 4500** | 1,3 | 2500 – 2750 | 2,0 | 750 - 1000 | **2,7** |
| **4000 - 4250** | 1,4 | 2250 – 2500 | 2,1 | 500 - 750 | **2,8** |
| **3750 - 4000** | 1,5 | 2000 – 2250 | 2,2 | 250 - 500 | **2,9** |
| **3500 - 3750** | **1,6** | **1750 – 2000** | **2,3** | **<250** | **3,0** |

Fonte: Crepani *et al.* (2001).

Para a declividade, foram consideradas as regras de reclassificação dos níveis de acordo com a declividade proposta por Crepani *et. al.* (2001) (Tabela 7). Essa classificação propõe atribuir maior grau de vulnerabilidade às áreas onde a declividade é mais intensa. Para o mapeamento, tais regras de classificação foram sintetizadas, levando em consideração os intervalos do grau de vulnerabilidade, visando assim uma melhor visualização e, consequentemente, um melhor entendimento.

**Tabela 7** – Critério para atribuição de pesos (Declividade)

| Regras de Reclassificação | Média | Grau de Vulnerabilidade |
|---|---|---|
| 0 thru 3.5 | 1 | Estável |
| 3.5 thru 5.8 | 1.1 | |
| 5.8 thru 8.2 | 1.2 | |
| 8.2 thru 10.3 | 1.3 | |
| 10.3 thru 12.9 | 1.4 | Moderadamente Estável |
| 12.9 thru 15.1 | 1.5 | |
| 15.1 thru 17.4 | 1.6 | |
| 17.4 thru 19.8 | 1.7 | |
| 19.8 thru 22.2 | 1.8 | Medianamente Estável/Vulnerável |
| 22.2 thru 24.5 | 1.9 | |
| 24.5 thru 27.2 | 2 | |
| 27.2 thru 29.6 | 2.1 | |
| 29.6 thru 32.1 | 2.2 | |
| 32.1 thru 34.6 | 2.3 | Moderadamente Vulnerável |
| 34.6 thru 37.2 | 2.4 | |
| 37.2 thru 39.8 | 2.5 | |
| 39.8 thru 42.4 | 2.6 | |
| 42.4 thru 45.3 | 2.7 | Vulnerável |
| 45.3 thru 48.1 | 2.8 | |
| 48.1 thru 50 | 2.9 | |
| 50 thru 1000 | 3 | |

Fonte: Crepani *et al.* (2001).

Após a obtenção da geomorfologia, em escala de 1:250.000, todos os elementos universais presentes no *layout* padrão foram utilizados para seu mapeamento.

d) Vulnerabilidade do clima

Para o desenvolvimento do fator clima de vulnerabilidade, recorreu-se a ferramenta ‘reclassificar por tabela’[5], na qual os novos valores foram atribuídos de acordo com a Tabela 8. Com os *rasters* da intensidade pluviométrica de 1991, 2001, 2011 e 2021 reclassificados, foram utilizados todos os elementos universais presentes no *layout* padrão, em escala de 1:250.000, e realizou-se o mapeamento do fator clima de vulnerabilidade.

**Tabela 8** – Valores de vulnerabilidade para a intensidade pluviométrica

| **Intensidade Pluviométrica (mm/mês)** | **V/E** | **Intensidade Pluviométrica (mm/mês)** | **V/E** | **Intensidade Pluviométrica (mm/mês)** | **V/E** |
|---|---|---|---|---|---|
| **< 50** | 1,0 | 200 – 225 | 1,7 | 375 - 400 | **2,4** |
| **50 - 75** | 1,1 | 225 – 250 | 1,8 | 400 - 425 | **2,5** |
| **75 - 100** | 1,2 | 250 – 275 | 1,9 | 425 - 450 | **2,6** |
| **100 - 125** | 1,3 | 275 – 300 | 2,0 | 450 - 475 | **2,7** |
| **125 - 150** | 1,4 | 300 – 325 | 2,1 | 475 - 500 | **2,8** |
| **150 - 175** | 1,5 | 325 – 350 | 2,2 | 500 - 525 | **2,9** |
| **175 - 200** | **1,6** | **350 – 375** | **2,3** | **> 525** | **3,0** |

Fonte: Crepani *et al.* (2001).

e) Vulnerabilidade do uso e cobertura da terra

Para a operacionalização da vulnerabilidade do uso e cobertura da terra na BHRPind, considerou-se a determinação proposta por Crepani *et. al.* (2001) quanto à extensão da cobertura vegetal, onde o autor considera a “importância da densidade da cobertura vegetal na determinação da vulnerabilidade, uma vez que os processos erosivos são potencializados nas áreas com reduzida cobertura vegetal” (Folharini; Oliveira; Furtado, 2017, p. 354).

Assim, na Tabela 9, foram estabelecidos os pesos de vulnerabilidade para o tema uso e cobertura da terra, sendo atribuídos valores de cobertura vegetal pré-determinados por Crepani *et. al.* (2001) dispostos no Anexo A, além de pesos designados empiricamente a partir de descrições de campo e com auxílio da legenda descritiva do Mapbiomas.

Com os *rasters* do uso e cobertura da terra de 1991, 2001, 2011 e 2021 reclassificados com os pesos estabelecidos, foram utilizados todos os elementos universais presentes no *layout* padrão, em escala de 1:250.000, e realizou-se o mapeamento da vulnerabilidade do uso e cobertura da terra.

**Tabela 9** – Valores de vulnerabilidade para o uso e cobertura da terra

| **Classe** | **Atribuição pré-estabelecidos de pesos** | **Atribuição empírica de pesos** | **Pesos** |
|---|---|---|---|
| Apicum | Pf + Pfh | - | 2,7 |

[5]Esse algoritmo reclassifica uma banda de *raster*, atribuindo novos valores de classe com base nos intervalos especificados em uma tabela fixa.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Mineração | - | Áreas referentes a extração mineral de porte industrial ou artesanal (garimpos), havendo clara exposição do solo por ação por ação antrópica. | 3,0 |
| Mangue | Pf | - | 2,0 |
| Área Urbanizada | - | Áreas com predominância da ação antrópica, principalmente relacionado a impermeabilização do solo. | 2,9 |
| Outras Áreas não Vegetadas | - | Áreas de superfícies não permeáveis (infra-estrutura, expansão urbana ou mineração) não mapeadas em suas classes. | 3,0 |
| Mosaico de Usos | - | Áreas de uso agropecuário onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura. | 3,0 |
| Formação Campestre | Sa + Sp + Sg + Ta + Tp + Tg | - | 2,4 |
| Outras Lavouras Temporárias | Cultura anual | - | 3,0 |
| Formação Savânica | Sa + Ta | - | 2,1 |
| Silvicultura | Cultura anual | | 3,0 |
| Rio, Lago e Oceano | - | Cursos de drenagem sem elementos de cunho vulnerável | 1,0 |
| Campo Alagado e Área Pantanosa | Pa | - | 1,6 |
| Soja | Cultura anual | - | 3,0 |
| Formação Florestal | Da + Db + Ds + Dm + Ha + Hb + Hs + Ld + La + Aa + Ab + As + Am + Fa + Fb + Fs + Fm + Ca + Cb + Cs + Cm + Vsp | - | 1,6 |
| Pastagem | Atribuído por Crepani *et. al.* (2001) como 2,8 | - | 2,8 |

Fonte: Crepani *et al.* (2001), adaptada parcialmente pelo pesquisador (2024).

## VI. Aplicação do método AHP na avaliação da importância relativa entre critérios

No processo de identificação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, levou-se em consideração o entendimento que determinados elementos, sejam eles ambientais ou antrópicos, são mais relevantes do que outros, na perspectiva de um resultado consistente com a realidade da área de estudos.

Para isso, recorreu-se ao Processo Analítico Hierárquico ou *Analytical Hierarchy Process* (AHP), uma técnica de origem matemática criada por Thomas L. Saaty, com o objetivo de realizar a organização e avaliação da importância relativa entre critérios, além de medir a consistência dos julgamentos relativos às importâncias atinentes aos critérios (Medeiros; Pereira; Almeida, 2012). Essa análise é realizada por meio da comparação de pares de critérios, a partir dos quais se tem um determinado grau de coerência, denominado razão de consistência.

Essa comparação de pares de critérios é regida a partir do grau de importância proposto por Saaty (1987 *apud* Pimenta *et. al.*, 2019) (Tabela 10):

**Tabela 10** – Escala absoluta, definição e justificativa para o processo decisório com a AHP

| Intensidade da importância da escala absoluta | Definição | Justificativa |
|---|---|---|
| 1 | Igual importância | As duas atividades contribuem equitativamente para o objetivo |
| 3 | Importância moderada de um sobre o outro fator | Julgamento e experiência favorecendo fortemente uma atividade sobre a outra |
| 5 | Essencial ou forte importância | Julgamento e experiência favorecendo fortemente uma atividade sobre a outra |
| 7 | Importância muito forte | Uma atividade é fortemente favorecida e sua dominância é demonstrada na prática |
| 9 | Importância extrema | Evidência favorecendo uma atividade sobre a outra é a mais expressiva possível na ordem deafirmação |
| 2, 4, 6, 8 | Valores intermediários entre os julgamentos adjacentes | Quando há necessidade de compromisso |

Fonte: Pimenta *et. al.* (2019), adaptada de Saaty (1987).

A partir disso, se realizou a comparação pareada (Tabela 11), seguindo a intensidade de importância de acordo com o grau de coerência (razão de consistência). É importante mencionar que o cálculo proposto possui um extenso detalhamento, optando-se por um modelo de matriz pronta obtida por *download* no *link*: https://www.pyzdekinstitute.com/blog/six-sigma/ahp-spreadsheet.html, produzida por Pyzdek (2019).

**Tabela 11** – Matriz de comparação pareada

| Item Number | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Item Description** | Geologia | Solos | Geomorfologia | Clima | Uso e cobertura |
| **Geologia** | **1,00** | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1/7 |
| **Solos** | 5,00 | **1,00** | 5 | 3 | 1/3 |
| **Geomorfologia** | 3,00 | 1/5 | **1,00** | 1 | 1/7 |
| **Clima** | 3,00 | 1/3 | 1,00 | **1,00** | 1/3 |
| **Uso e cobertura** | 7,00 | 3,00 | 7,00 | 3,00 | **1,00** |
| **Sum** | 19,00 | 4,73 | 14,33 | 8,33 | 1,95 |

Fonte: Pyzdek (2019), adaptada pelo pesquisador (2022).

A partir da matriz pareada, pôde-se obter os valores de influência de cada plano de informação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré (Tabela 12), seguindo as características apresentadas na planilha de cálculo.

**Tabela 12** – Matriz padronizada

| | **Geologia** | **Solos** | **Geomorfologia** | **Clima** | **Uso e cobertura** | **Peso** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Geologia** | 0,05 | 0,04 | 0,02 | 0,04 | 0,07 | **4,6%** |
| **Solos** | 0,26 | 0,21 | 0,35 | 0,36 | 0,17 | **27,1%** |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Geomorfologia** | 0,16 | 0,04 | 0,07 | 0,12 | 0,07 | **9,3%** |
| **Clima** | 0,16 | 0,07 | 0,07 | 0,12 | 0,17 | **11,8%** |
| **Uso e cobertura** | 0,37 | 0,63 | 0,49 | 0,36 | 0,51 | **47,3%** |

Fonte: Pyzdek (2019), adaptada pelo pesquisador (2022).

Nos cálculos gerados na planilha, o autovalor máximo ou λmax, corresponde a 5,255. Assim, buscando a identificação de consistência da matriz de comparação, aplicou-se o índice de consistência, representado pela razão da diferença entre λmax e o número de critérios (PIs), e pela diferença de n-1.

Logo, aplicando o cálculo do índice de consistência I.C = λmax-n/n-1, tem-se 5,255-5/5-1 = 0,064, sendo esse o desvio de consistência. Gerado o cálculo, faz-se necessário a avaliação da aceitabilidade do resultado, ou seja, uma consistência, que deve ser realizada partir da obtenção da razão de consistência (Junior; Rodrigues, 2012), ou RC, na qual RC = IC / IR, onde IC = Índice de Consistência e IR = Índice Randômico.

Para Junior e Rodrigues (2012, p. 13), a partir da orientação de Saaty (1980):

> Índice Randômico (IR) é derivado de uma amostra de 500 matrizes recíprocas geradas de forma randômica. O IR utiliza uma escala de 9 pontos e é extraído da tabela de valores para matrizes quadradas de ordem n estabelecida pelo Oak Ridge National Laboratory, EUA.

Assim, o Índice Randômico representa um valor que varia de acordo com o número de critérios do problema, ou fator n, como descrito na Tabela 13. A partir deste índice, tem-se a razão de consistência IC / IR = 0,064 / 1,12 = 0,06 arredondado, sendo esta consistência aceitável a partir de valores abaixo de 0,10 (Junior; Rodrigues, 2012).

**Tabela 13** – Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n

| **n** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **IR** | 0 | 0 | 0,58 | 0,9 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 |

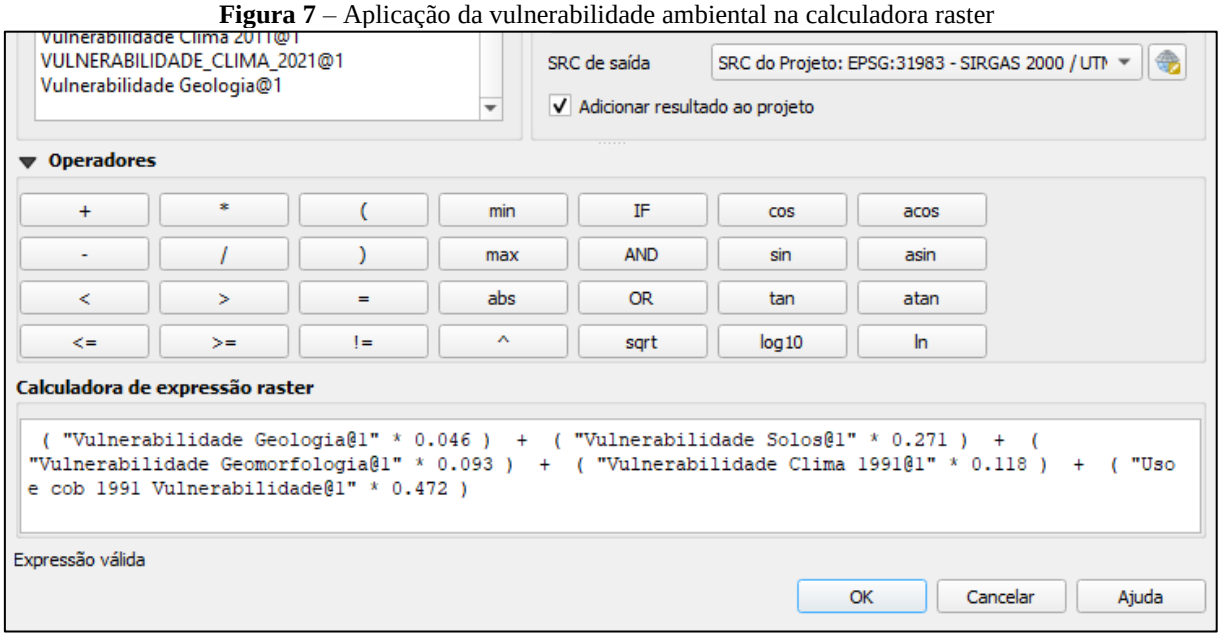
Fonte: Saaty (1980).

## VII. Mapeamento da vulnerabilidade ambiental

Nos mapas de vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, é possível observar a evolução da estabilidade ou instabilidade da bacia de 1991 a 2021. Para isso, realizou-se a correlação dos fatores obtidos a partir da operação de álgebra de mapas, utilizando a calculadora *raster* do Qgis (Figura 7). Esta etapa permite a interação entre os mapas de vulnerabilidade e os pesos atribuídos pelo *Analystic Hierarchy Process*, interpretando a

maior ou menor suscetibilidade de cada tema à perda do solo, ou seja, à vulnerabilidade ambiental da BHRPind.

**Figura 7** – Aplicação da vulnerabilidade ambiental na calculadora raster




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2024).

O mapeamento dos trinta anos considerou todos os planos de informação universais, como geologia, solos e geomorfologia, além dos individuais, com os intervalos de 1991, 2001, 2011 e 2021 para os parâmetros clima e uso e cobertura da terra. Para a definição dos intervalos na legenda do mapa síntese de vulnerabilidade, se utilizou da mesma nomenclatura dos graus de vulnerabilidade propostas por Crepani *et. al.* (2001): Estável (1,0 – 1,3); Moderadamente Estável (1,4 – 1,7); Medianamente Estável/Vulnerável (1,8 – 2,2); Moderadamente Vulnerável (2,3 – 2,6); e Vulnerável (2,7 – 3,0) (Tabela 14).

**Tabela 14** – Nomenclatura dos graus de vulnerabilidade da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA

| Grau de vulnerabilidade | Média | Código | Cores Sintetizadas |
|---|---|---|---|
| Estável | 1,0 – 1,3 | #0000ff | |
| Moderadamente Estável | 1,4 – 1,7 | #00ffff | |
| Medianamente Estável/Vulnerável | 1,8 – 2,2 | #00ff00 | |
| Moderadamente Vulnerável | 2,3 – 2,6 | #ffff00 | |
| Vulnerável | 2,7 – 3,0 | #ff0000 | |

Fonte: Crepani *et. al.* (2001). Elaborada pelo pesquisador (2024).

Após a normatização de nomenclaturas e cores, em ambiente SIG, foram inseridos todos os elementos universais presentes no *layout* padrão, em escala de 1:250.000, para a realização do mapeamento da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré nos anos de 1991, 2001, 2011 e 2021.

## VIII. Matriz de Vulnerabilidade Fator x Evento

Após a análise da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, se fez necessário o entendimento acerca das perspectivas de cenários ocorrentes na bacia, perante os fatores analisados no intervalo de trinta anos. Nesse contexto, optou-se pela utilização da Matriz de Correlação Causa x Efeito, proposta por Leopold (1971), a qual "tem sido utilizada em Estudos de Impactos Ambientais,procurando associar os impactos de uma determinada ação de um empreendimento com as diversas características ambientais de sua área de influência" (Mota; Aquino 2002, p. 1).

A utilização da Matriz de Correlação Causa x Efeito, proposta por Leopold (1971), se deu em forma de exemplo e adaptação para a criação da Matriz de Vulnerabilidade Fator x Evento, com o objetivo de avaliar a influência direta e indireta dos fatores de vulnerabilidade das unidades de paisagem em eventos potenciais, a partir dos parâmetros Magnitude, Importância e Duração (Quadro 3).

**Quadro 3** – Parâmetros de avaliação utilizados na matriz de vulnerabilidade Fator x Evento

| ATRIBUTO | SIGNIFICADO DO PARÂMETRO DE AVALIAÇÃO | SÍMBOLO |
|---|---|---|
| **MAGNITUDE** Indica a extensão do evento com influência do fator de vulnerabilidade. | **PEQUENA** De magnitude inexpressiva, inalterando a característica ambiental considerada. | **P** |
| | **MÉDIA** De magnitude expressiva, porém, sem alcance para descaracterizar a característica ambiental considerada. | **M** |
| | **GRANDE** De magnitude tal que possa levar à descaracterização da característica ambiental considerada. | **G** |
| **IMPORTÂNCIA** Indica a influência do fator em relação ao evento potencial. | **NÃO SIGNIFICATIVA** De influência não significativa, com interferência não implicando em alteração na paisagem. | **1** |
| | **MODERADA** De influência com dimensões recuperáveis, quando vulneráveis. | **2** |
| | **SIGNIFICATIVA** A influência acarreta perda na capacidade de recuperação do ambiente, quando vulnerável. | **3** |
| **DURAÇÃO** Indica a permanência da vulnerabilidade do fator em relação ao evento. | **CURTA** De duração breve, com possibilidade de reversão às condições ambientais anteriores ao estado de vulnerabilidade. | **4** |
| | **MÉDIA** Tempo médio de permanência da vulnerabilidade. | **5** |
| | **LONGA** Tempo grande ou permanente, de permanência da vulnerabilidade. | **6** |

Fonte: Mota e Aquino (2002), adaptado pelo pesquisador (2022).

Com a execução da Matriz de vulnerabilidade Fator x Evento, foi possível alinhar a influência dos fatores geoambientais, como geologia, solos, relevo, clima e cobertura vegetal, além de elementos de cunho antrópico como uso da terra, com os mais comuns e possíveis eventos da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, a fim de apresentar uma perspectiva de características desses episódios, em virtude do risco.

## IX. Análise de campo

O trabalho de campo, em sua síntese, teve como objetivo demonstrar, verificar e analisar parâmetros reais de áreas mapeadas. Nesta etapa da pesquisa, utilizou-se a observação direta dos elementos presentes no espaço, realizando o reconhecimento da área de estudo, podendo assim validar informações acerca dos parâmetros geoambientais, como geologia, relevo, solo e, principalmente, o uso e cobertura da terra, correlacionando com as averiguações já realizadas em materiais bibliográficos e cartográficos referentes à bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA.

Foram utilizados recursos iconográficos (fotográficos), registrando pontos de interesse para a pesquisa, com o intuito de melhor compreender a dinâmica ocorrente na bacia, a fim de alcançar os objetivos estabelecidos. Além do recurso iconográfico, utilizou-se um veículo aéreo não tripulado, um “drone” acoplado com câmera, para o monitoramento e validação dos aspectos de uso e cobertura da terra. A escolha desse recurso se deu em vista da necessidade de compreensão do todo em relação à ação antrópica e meio natural, sendo possível, com o auxílio dessa ferramenta, localizar e diagnosticar as áreas de transição de ocupações.

No processo de execução do trabalho de campo, realizou-se uma atividade de campo em outubro de 2023, entre os dias 24 e 29. Foram percorridos os municípios de Cajari, Alto Alegre do Pindaré, Buriticupu, Bom Jesus das Selvas e Bom Jardim.

É importante mencionar que projetos envolvendo a bacia hidrográfica do Rio Pindaré já estavam em andamento no momento de execução da presente pesquisa, e esses projetos serviram de referência e auxílio, principalmente quanto ao campo realizado no ano de 2021, entre os dias 25 e 30 de novembro, nos municípios de Cajari, Viana, Alto Alegre do Pindaré, Pindaré-Mirim, Bom Jesus das Selvas e Santa Luzia, além da Terra Indígena Caru.

# CAPÍTULO 4

## INVENTÁRIO E VULNERABILIDADE DOS ELEMENTOS AMBIENTAIS

*Caminho para Alto Alegre do Pindaré – Rio Zutiua (2023).*

O inventário geoambiental foi organizado para apresentar os resultados e discussões dos seguintes componentes ambientais: i) Geologia; ii) Solos; iii) Geomorfologia; iv) Índice de dissecação do relevo; v) Declividade; vi) Intensidade Pluviométrica.

## **4.1** Geologia

Quanto à geologia da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, identificou-se seis classes litoestratigráficas diferentes, são elas: Coberturas Lateríticas Maturas; Depósitos Aluvionares; Depósitos de Pântanos e Mangues; Depósitos Flúvio-lagunares; Formação Ipixuna e Formação Itapecuru (Figura 8).

Segundo Costa *et al.* (2005 *apud* Lopes; Teixeira, 2013, p. 26), associada a eventos climáticos importantes e grandes flutuações do nível do mar, tem-se a "Cobertura Laterítica Matura, formada por volta de 26-24 Ma, pela alteração química de rochas preexistentes. Nela se acumularam depósitos de alumínio, fosfato, caulim etc".

Tais coberturas têm ocorrência no sul do bioma maranhense, ou seja, nos planaltos dissecados da Serra de Tiracambu e nos topos das chapadas, caracterizando-se, em função das lateritas, como áreas de recargas de aquíferos em decorrência da macroporosidade, sendo importantes áreas de recarga do aquífero Barreiras e, por infiltração vertical, alimentando também os aquíferos Itapecuru, Corda e Sambaíba (IMESC, 2019).

> Na Amazônia, os minerais mais frequentes nas lateritas maturas são: caulinita, quartzo, goethita aluminosa, gibsita e fosfatos aluminosos. Destacam-se ocorrências de lateritas fosfáticas estroncíferas em Trauira e Pirocaua; lateritas titanífero, em Jacaré e lateritas manganesífera, em Aurizona (Costa, 1991 *apud* IMESC, 2019, p. 33).

As coberturas encontram-se espalhadas na parte centro-sul da bacia, abrangendo os municípios de Buriticupu, Bom Jesus das Selvas, Amarante do Maranhão, Itinga do Maranhão, Arame, Açailândia, entre outras pequenas porções.

Observou-se também a presença dos Depósitos Aluvionares, "Os Depósitos Aluvionares são constituídos por areias e argilas que estão sendo transportadas e depositadas pelos rios e igarapés desde os últimos 10 mil anos" (Lopes; Teixeira, 2013, p. 27). Eles, assim como os depósitos eólicos e lateríticos, são constituídos por sedimentos esbranquiçados e avermelhados com textura fina e média, quartzosa, e com lateritas centimétricas e milimétricas angulosas a subangulosas, que são provenientes das atividades dos rios, correspondendo a fácies de canais e barras de canais fluviais (Veiga Junior, 2000 *apud* IMESC, 2019).

Os depósitos são normalmente encontrados no decorrer das margens dos rios maranhenses Maracaçumé, Pindaré, Mearim, Itapecuru, entre outros, onde a extração mineral, lazer, ecoturismo e pesca são atividades rotineiras (IMESC, 2019). Eles têm pouca ocorrência na área de estudo, estando presentes principalmente na foz da bacia, mais precisamente nos municípios de Monção, Penalva e Governador Newton Bello.

Outra unidade litoestratigráfica identificada foi os Depósitos de Pântanos e Mangues, correspondendo, em sua maioria, ao município de Viana. Tal unidade encontra-se em pequena escala na área da bacia, abrangendo apenas 7,63154 km$^2$ (Tabela 15).

> Na época holocênica ocorreu a sedimentação dos Depósitos de Pântanos e Mangues, principalmente na costa ocidental maranhense, que é caracterizada pela presença de inúmeros estuários, com uma série de ilhas, baías e canais. São constituídos, predominantemente, por sedimentos lamosos (argila e silte), de coloração cinza, não adensados, maciços e bioturbados (Rodrigues *et al*., 1994 *apud* Lopes; Teixeira, 2013, p. 27).

Entre 12-11 mil anos (Pleistoceno Superior), iniciou-se a formação dos Depósitos Flúvio-lagunares, quando, a partir de um evento transgressivo, ocorreu o afogamento dos baixos cursos dos rios Pindaré, Mearim, Itapecuru e Munim, causando a deposição de argilas adensadas com areia fina disseminada (Rodrigues *et al*., 1994 *apud* Lopes; Teixeira, 2013).

Os depósitos flúvio-lagunares são compostos por sedimentos argilosos, areia fina de coloração cinza escura e silte; encontram-se presentes na região do Golfão Maranhense e Baixada Maranhense, mais precisamente nas planícies de inundação dos lagos de Cajari, Penalva, Viana, Monção e outros, possuindo vegetação herbáceas e grampiformes, e recebendo a influência de águas de rios, subterrâneas e de chuvas ocorrentes na região (IMESC, 2019).

A Formação Ipixuna é composta por siltito e argilito, com intercalações argilosas; conglomerados oligomíticos com arcabouço organizado; arenito médio a grosso, com grânulos e bolas de argila, com estratificação cruzada acanalada de pequeno porte; pelitos de cores variegadas com bioturbação e pelitos caulínicos de aspecto maciço; ambiente flúvio-lacustre e estuarino; contém depósitos de bauxita e caulim (GEOSGB, 2022).

Segundo Villas Boas e Araújo (1999 *apud* Lopes; Teixeira, 2013, p. 25), “a Formação Ipixuna é constituída por conglomerados, arenitos e pelitos depositados em sistema de rios meandrantes”. Tem idade variando de 70 a 23 Ma (Cretáceo Superior e Paleógeno) (Jupiassú, 1970 *apud* Lopes; Teixeira, 2013).

Tal formação encontra-se situada no centro-sul da bacia, onde faz margem aos cursos d’água, juntamente com a Formação Itapecuru, abrangendo os municípios de Buriticupu, Bom Jesus das Selvas, Bom Jardim, Itinga do Maranhão e Açailândia.

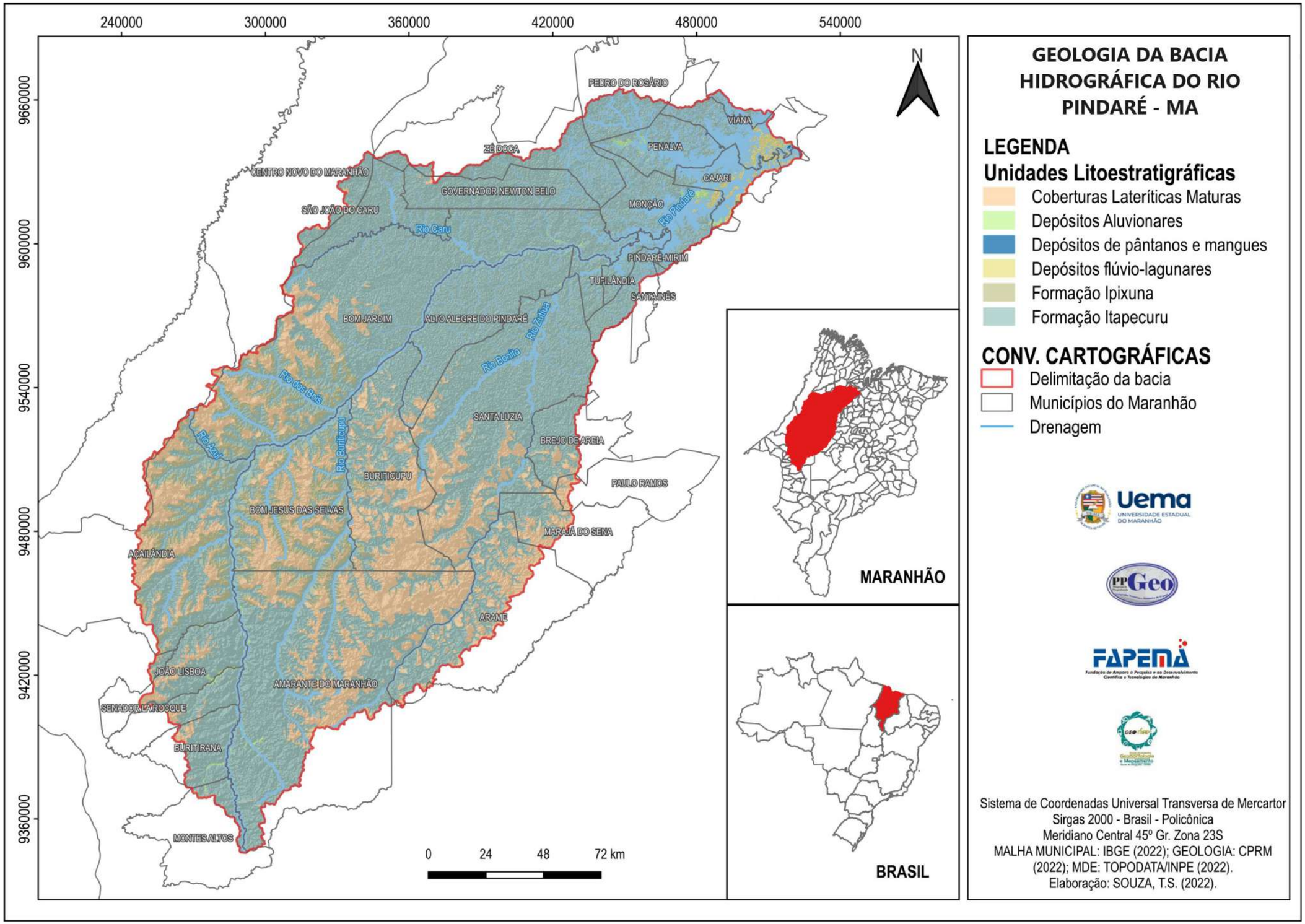
Também há o Grupo Itapecuru. “O Grupo Itapecuru é um conjunto de formações composto por variados tipos de rochas, como arenitos, argilitos, siltitos, folhelhos intercalados com arenitos depositados em vários ambientes (fluvial, deltaico e lagunar)” (Anaisse Júnior, 1999; Gonçalves; Carvalho, 1996; Lima; Leite, 1978 *apud* Lopes; Teixeira, 2013, p. 25). Tem idade variando de 90 a 93 Ma (Cretáceo Superior) (Rossetti *et al*., 2001 *apud* Teixeira, 2013) e ocupa grande parte da região norte e central da bacia, estando presente desde Alto Alegre até Matinha, correspondendo um total de 25.071,86 km$^2$.

**Tabela 15** – Unidades litoestratigráficas da bacia hidrográfica do Rio Pindaré e suas respectivas concentrações

| **Unidades litoestratigráficas** | **Área em (km$^2$)** | **Área em (%)** |
|---|---|---|
| Água | 605,4 | 1,50% |
| Coberturas Lateríticas Maturas | 10.029,50 | 24,82% |
| Depósitos Aluvionares | 1.477,42 | 3,66% |
| Depósitos de pântanos e mangues | 7,63154 | 0,02% |
| Depósitos flúvio-lagunares | 671,355 | 1,66% |
| Formação Ipixuna | 2.538,79 | 6,28% |
| Formação Itapecuru | 25.071,86 | 62,06% |
| Total | 40.401,96 | 100% |

Fonte: CPRM (2012). Organizada pelo pesquisador (2022).

**Figura 8** – Mapa de geologia da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2022).

## 4.2 Vulnerabilidade da geologia das unidades de paisagem

A BHRPind, em seu parâmetro relacionado à geologia, demonstra um considerável teor de vulnerabilidade, levando em consideração os elementos analisados. Quanto ao arenito quartzoso, sua nota foi atribuída aos arenitos identificados na Formação Ipixuna, bem como aos arenitos e arenitos arcoseanos identificados na Formação Itapecuru. Essa atribuição parte do pressuposto de que os arenitos, de modo geral, são compostos por grãos de quartzo, sendo que, mesmo o arcoseano, apesar do alto teor de feldspato, ainda tem o quartzo como parte de sua composição.

Para a definição da nota do pelito, foi feita a média aritmética entre a nota dos argilitos e dos siltitos, sendo 2,7. A escolha desse método é referente ao fato de que os pelitos são rochas compostas pela fração de componentes argilosos e do silte, tendo os argilitos e siltitos uma composição aproximada.

A vulnerabilidade geológica da bacia hidrográfica do Rio Pindaré (Figura 9) foi definida entre: Medianamente Estável/Vulnerável, Moderadamente Vulnerável e Vulnerável. De acordo com a metodologia proposta por Crepani, as rochas com maior teor de porosidade e mais fraturadas possuem alta capacidade de retenção de água, agindo como o principal agente modificador do relevo. Sendo assim, estão mais intemperizadas, pois permanecem por mais tempo em contato com a água, deixando os grãos que formam as rochas mais expostos (Medeiros; Pereira; Almeida, 2012).

Na BHRPind, a classe ‘Moderadamente Vulnerável’ compreende um total de 27.610,65 $km^2$, representando 68,34% do total da área da bacia (Tabela 16), abrangendo grandes extensões dos municípios de Bom Jardim, Governador Newton Belo, Alto Alegre do Pindaré, Santa Luzia, São João do Caru, entre outros. As áreas classificadas como ‘Vulneráveis’ representaram principalmente as regiões próximas a foz, correspondendo a um total de mais de 2.156 $km^2$, estando associado majoritariamente aos Depósitos de Pântanos e Mangues, Depósitos Flúvio-lagunares, e Depósitos Aluvionares.

Os Depósitos Aluvionares demonstraram um alto teor de vulnerabilidade, apresentando os litotipos: areia, argila, cascalho, areia arcoseana, conglomerado polimítico e silte; materiais esses com grande presença de espaços entre os grãos (poros), tendo grande potencial de retenção de água. Tal unidade situa-se nas margens dos cursos de drenagem, próximas à foz da bacia.

Já mais ao sul e centro da bacia, tem-se a presença das Coberturas Lateríticas Maturas, formações essas compostas pela laterita, material residual que, quando disposto a grandes

profundidades, sustentando superfícies aplainadas e solos espessos, demonstram alto grau de evolução, baixo grau de saturação em bases, com mineralogia amplamente dominada pela caulinita (por vezes associada à gibbsita AlO.OH) na fração argila, e quartzo + minerais pesados resistentes (zircão, turmalina, estaurolita e outros), além de uma baixa relação silte/argila (Espindola, 1979 *apud* Espindola; Daniel, 2008).

Entretanto, quando os corpos lateríticos estão dispostos nas proximidades da superfície, afetam as condições de drenagem externa (escoamento superficial) e interna (permeabilidade, percolação) do meio de ocorrência, estando assim associados à possibilidade de processos erosivos e intemperismo (Espindola, 1979 *apud* Espindola; Daniel, 2008).

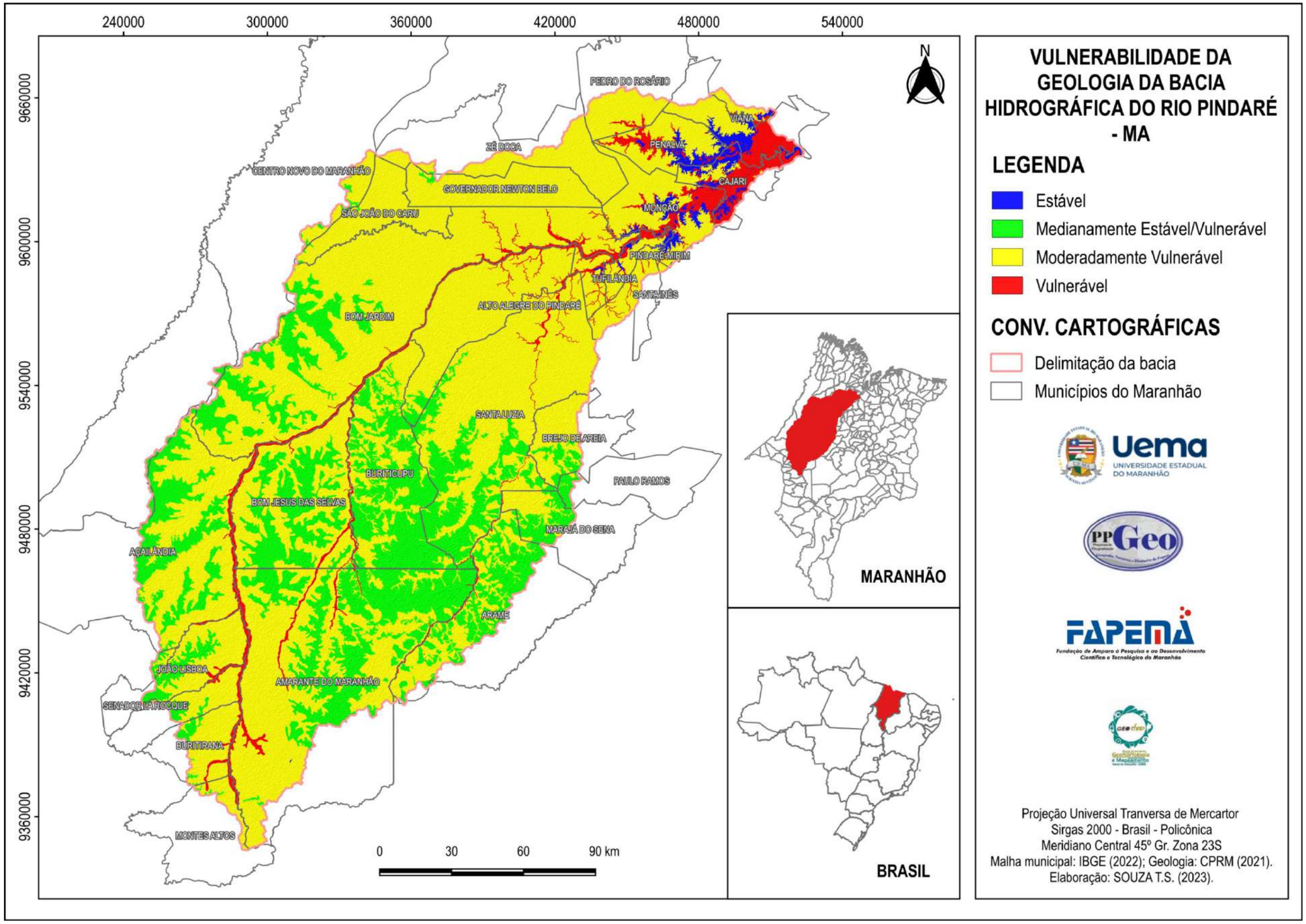
As Coberturas Lateríticas Maturas corresponderam inteiramente à classe Medianamente Estável/Vulnerável, com 10.029,50 km$^2$, abrangendo 24,82% do total da área da bacia hidrográfica do Rio Pindaré.

**Tabela 16** – Vulnerabilidade da geologia das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA

| Vulnerabilidade | Área (Km$^2$) | Área em % |
|---|---|---|
| **Estável** | 605,4 | 1,50% |
| **Medianamente Estável/Vulnerável** | 10.029,50 | 24,82% |
| **Moderadamente Vulnerável** | 27.610,65 | 68,34% |
| **Vulnerável** | 2.156,40654 | 5,34% |
| **Total** | 40.401,96 | 100% |

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2023).

**Figura 9** – Vulnerabilidade da geologia das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2022).

## 4.3 Solos

Quanto aos solos da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, tem-se a predominância de Argissolos, Gleissolos, Latossolos, Luvissolos, Neossolos e Plintossolos (Figura 10).

Na área da bacia, os Argissolos se manifestam com os Argissolos Amarelos Distrófico e com os Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos, sendo este último de maior proporção na BHRPind, com 14371,603 km$^2$ (Tabela 17). Eles se manifestam principalmente nos municípios de Pedro do Rosário, Zé Doca, Governador Newton Belo, Bom Jardim, Santa Luzia, Alto Alegre do Pindaré, São João do Caru, Centro Novo do Maranhão, Brejo de Areia, Paulo Ramos, Arame, Buriticupu, Bom Jesus das Selvas, Itinga do Maranhão, Açailândia, João Lisboa, Buritirana e Amarante do Maranhão.

Os Gleissolos são solos caracterizados "pela forte gleização em decorrência do ambiente redutor virtualmente livre de oxigênio dissolvido em razão da saturação por água durante todo o ano ou pelo menos por um longo período" (EMBRAPA, 2018, p. 92). Se manifestam na área da bacia a partir dos Gleissolos Háplicos Ta Eutróficos, Gleissolos Háplicos Tb Distróficos, e Gleissolos Tiomórficos Órticos. Estes solos encontram-se presentes nos municípios de Penalva, Pedro do Rosário, Cajari, Monção, Tufilandia, Bom Jardim, Buriticupu, Alto Alegre do Pindaré, Bom Jesus das Selvas, Açailândia, Amarante do Maranhão, João Lisboa, Senador La Roque, Buritirana, Montes Altos, Igarapé do Meio, Viana e Matinha.

Os Latossolos, na bacia do Rio Pindaré, se apresentam a partir dos Latossolos Amarelos Distrocoesos, nos municípios de Amarante do Maranhão, Buriticupu, Açailândia, Bom Jesus das Selvas e Santa Luzia; Latossolos Amarelos Distróficos, com grande predominância no município de Açailândia, Bom Jesus das Selvas e Santa Luzia; e o Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, com média extensão ao sul da bacia, abrangendo os municípios de João Lisboa, Senador La Rocque, Buritirana e Amarante do Maranhão.

> Latossolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico precedido de qualquer tipo de horizonte A dentro de 200cm a partir da superfície do solo ou dentro de 300cm se o horizonte A apresenta mais que 150cm de espessura (EMBRAPA, 2018, p. 195).

Os Luvissolos, solo constituído de materiais minerais e argilas, apresentado na bacia a partir do Luvissolo Háplico Órtico, é predominante no município de Brejo de Areia. Já os Neossolos, solos mais jovens, identificados na foz da bacia com o Neossolo Flúvico Ta Eutrófico, abrange os municípios de Pindaré Mirim, Cajari, Viana, Monção e Tufilândia; e ao sul da bacia com os Neossolos Litólicos Distróficos, predominante nos municípios de Amarante

do Maranhão e Montes Altos; e com os Neossolos Quartzarênicos Órticos também presentes nas cidades supracitadas. Os Neossolos, em geral, são "constituídos por material mineral ou por material orgânico com menos de 20 cm de espessura, não apresentando nenhum tipo de horizonte B diagnóstico" (EMBRAPA, 2018, p. 219).

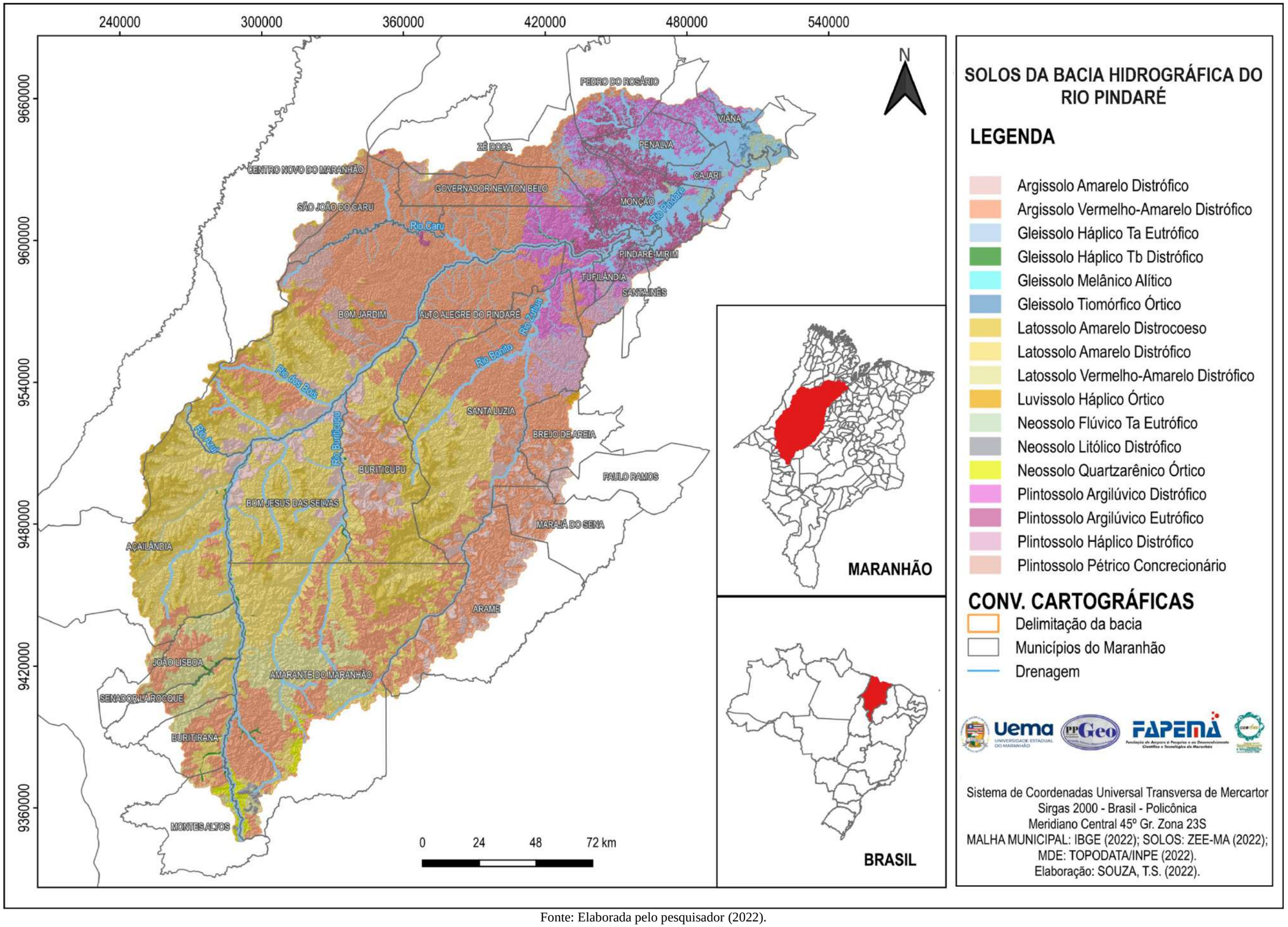
Quanto aos Plintossolos, "solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte plíntico, litoplíntico ou concrecionário" (EMBRAPA, 2018, p. 261), têm-se os Plintossolos Argilúvicos Distróficos, com ocorrência ao norte da bacia, abrangendo grande parte de Altamira do Maranhão, Tufilândia, Matinha, Viana, Penalva, Pedro do Rosário, Governador Newton Belo, Bom Jardim e Alto Alegre do Pindaré; os Plintossolos Háplicos Distróficos, com ocorrência em Altamira do Maranhão, Santa Luzia, Santa Inês e Tufilândia; os Plintossolos Argilúvicos Eutróficos, nos municípios de Penalva, Pedro do Rosário, Governador Newton Belo, Bom Jardim, Zé Doca, Pindaré Mirim, Monção, Santa Inês e Tufilândia; e os Plintossolos Pétricos Concrecionários, estando presentes em Centro Novo do Maranhão, Bom Jardim, São João do Caru e Governador Newton Bello.

**Tabela 17** – Classes de solos da bacia hidrográfica do Rio Pindaré e suas respectivas concentrações

| Solos | Área em ($km^2$) | Área em % |
|---|---|---|
| **Água** | 605,4 | 1,50% |
| **Argissolo Amarelo Distrófico** | 2.323,678 | 5,75% |
| **Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico** | 14.371,603 | 35,57% |
| **Gleissolo Háplico Ta Eutrófico** | 248,042 | 0,61% |
| **Gleissolo Háplico Tb Distrófico** | 1.173,067 | 2,90% |
| **Gleissolo Melânico Alítico** | 23,025 | 0,06% |
| **Gleissolo Tiomórfico Órtico** | 105,819 | 0,26% |
| **Latossolo Amarelo Distrocoeso** | 3.799,323 | 9,40% |
| **Latossolo Amarelo Distrófico** | 9.233,533 | 22,85% |
| **Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico** | 1.894,303 | 4,69% |
| **Luvissolo Háplico Órtico** | 17,939 | 0,04% |
| **Neossolo Flúvico Ta Eutrófico** | 551,349 | 1,36% |
| **Neossolo Litólico Distrófico** | 47,327 | 0,12% |
| **Neossolo Quartzarênico Órtico** | 221,464 | 0,55% |
| **Plintossolo Argilúvico Distrófico** | 2.570,442 | 6,36% |
| **Plintossolo Argilúvico Eutrófico** | 1.640,95 | 4,06% |
| **Plintossolo Háplico Distrófico** | 827,278 | 2,05% |
| **Plintossolo Pétrico Concrecionário** | 747,422 | 1,85% |
| **Total** | **40401,96** | **100%** |

Fonte: ZEE – MA (2021). Organizada pelo pesquisador (2022).

**Figura 10** – Mapa de solos da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2022).

## 4.4 Vulnerabilidade da pedologia das Unidades da Paisagem

As unidades de paisagem natural consideradas vulneráveis ocorrem em solos rasos e pouco desenvolvidos, ou seja, o principal atributo é a limitada evolução dos perfis de solo (Crepani *et. al.*, 2001). Na bacia do Rio Pindaré, esses solos abrangem todas as classes de Plintossolos (Plintossolos Argilúvicos Distróficos, Plintossolos Háplicos Distróficos, Plintossolos Argilúvicos Eutróficos, Plintossolos Pétricos Concrecionários); todas a classes de Gleissolos (Gleissolos Háplicos Ta Eutróficos, Gleissolos Háplicos Tb Distróficos, e Gleissolos Tiomórficos Órticos); e os Neossolos, representados pelos Neossolo Flúvico Ta Eutrófico, Neossolos Litólicos Distróficos e Neossolos Quartzarênicos Órticos (Figura 11).

Essa vulnerabilidade está associada ao fato de que os primeiros, os Plintossolos, além de solos rasos, possuem uma baixa carga de nutrientes e um alto teor de umidade. Essas características colaboram para que tal solo, na área da bacia, apresente dificuldades no que diz respeito à agricultura, necessitando de correções e/ou utilização de maquinário específico, que são passíveis de danos ao meio natural.

Assim como os Plintossolos, os Gleissolos também se caracterizam como solos com alto teor de água, estando associado a intensos processos erosivos e, consequentemente, a uma alta vulnerabilidade ambiental. Já o Neossolo é considerado o menos desenvolvido, apresenta baixa estabilidade agrícola, estando também associado a pastagem e pequenas porções de formações florestais resistentes na área da bacia.

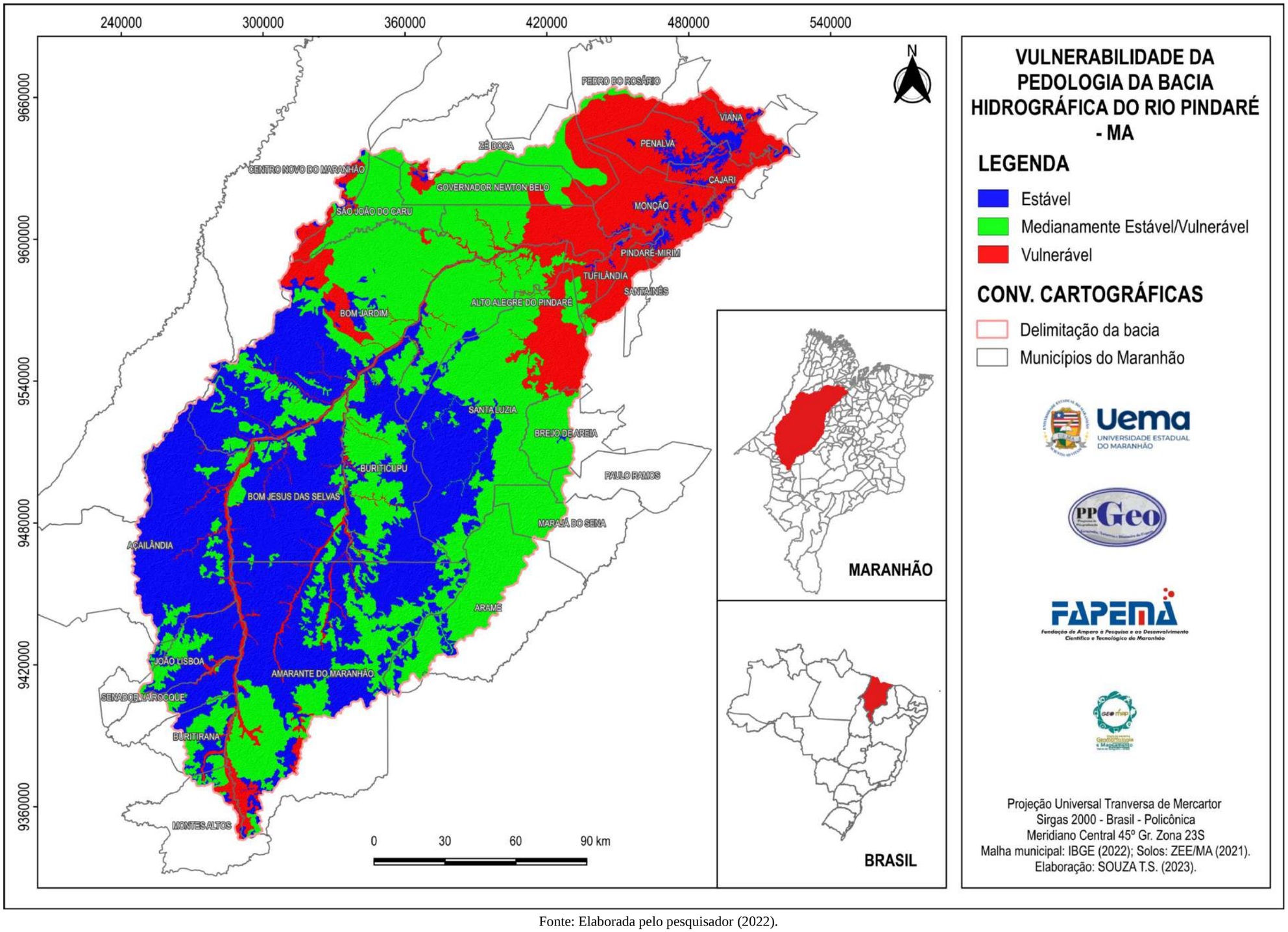
Em geral, as áreas situadas ao sul da bacia, especificamente os municípios de Amarante do Maranhão, Açailândia e Bom Jesus das Selvas, representam as porções da BHRPind com maior nível de estabilidade, correspondendo a 38,49% do total da área de estudos (Tabela 18). Ao centro, encontram-se as áreas medianamente estáveis/vulneráveis, que possuem peso 2,0 na análise de vulnerabilidade; tais áreas correspondem a um corredor que vai desde São João do Caru, passando por Alto Alegre do Pindaré e Santa Luzia, até os municípios de Marajá do Sena e Arame. As áreas vulneráveis da bacia hidrográfica do Rio Pindaré estão localizadas a nordeste da área de estudo, correspondendo um total de 8.151,484 km$^2$, abrangendo, respectivamente, os municípios de Penalva, Viana, Pindaré-Mirim, Cajari, Santa Inês, Monção e Tufilândia.

**Tabela 18** – Vulnerabilidade dos solos das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA

| Vulnerabilidade | Área (Km$^2$) | Área em % |
|---|---|---|
| **Estável** | 15.549,519 | 38,49% |
| **Medianamente Estável/Vulnerável** | 16.700,957 | 41,34% |
| **Vulnerável** | 8.151,484 | 20,18% |
| **Total** | 40.401,96 | 100,00% |

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2023).

**Figura 11** – Vulnerabilidade dos solos das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2022).

## 4.5 Geomorfologia

Quanto à geomorfologia da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, foram identificadas as unidades geomorfológicas Baixada Maranhense, Depressão de Imperatriz, Depressão do Gurupi, Planalto Dissecado do Gurupi – Grajaú, Planícies e Terraços Fluviais, Superfície Dissecada de Santa Luzia do Paruá e Superfície Sublitorânea de Bacabal (Figura 12).

A unidade Baixada Maranhense, presente na região geomorfológica Golfão Maranhense, corresponde às regiões baixas e alagadiças das embocaduras afogadas dos rios Mearim e Pindaré, caracterizando-se, sobretudo, por solos salinos. Ela está embutida na Superfície Sublitorânea de Bacabal (IBGE, 2022).

Segundo Feitosa (2006, p. 8):

> A Baixada Maranhense constitui um ambiente rebaixado, de formação sedimentar recente, ponteado de relevos residuais, formando outeiros e superfícies tabulares cujas bordas decaem em colinas de declividades variadas. A convergência dos cursos dos rios Mearim, Pindaré e Grajaú, associada a movimentos transgressivos e regressivos do mar, modelou o ambiente deposicional que é preenchido pelo excedente de águas fluviais no período chuvoso, dando origem a extensas superfícies lacustres que condicionam a vida das comunidades residentes na região.

Segundo o autor supracitado, “a fisionomia da Baixada Maranhense é marcada pela grande dimensão fisiográfica e econômica das bacias lacustres, com destaque para os lagos: Açu, Cajari, Bacuri, Formoso e Viana” (Feitosa, 2006, p. 8). Na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, essa unidade compreende principalmente os municípios de Viana e Cajari, nas proximidades da foz da bacia.

A Depressão de Imperatriz, localizada na região geomorfológica Depressão dos Rios Tocantins – Araguaia, compreende ao interflúvio do baixo Tocantins-Araguaia e parte da margem norte do Tocantins, bordejando os Planaltos Dissecados do Gurupi-Grajaú, caracterizando-se pela presença de formas tabulares e convexas amplas, com feição de lombadas definidas por vales fracamente entalhados em arenitos da Formação Itapecuru (IBGE, 2022); também “por relevos planos rampeados em direção às principais drenagens” (Correia Filho, 2011, p. 18). Tal unidade, na área da BHRPind encontra-se presente nos municípios de Buritirana e Montes Altos.

A Depressão do Gurupi, presente na região geomorfológica Depressão Maranhense, corresponde a um extenso vão embutido entre a Chapada de Paragominas e o Planalto Dissecado do Gurupi-Grajaú, que se abre para nordeste, em direção às Colinas e Cristas do Gurupi. Composta sobre sedimentos argilo-arenosos de idade cretácea (Formação Itapecuru),

caracteriza-se como uma superfície plana a suavemente dissecada, na qual ocorrem Latossolos Amarelos, com vegetação de floresta parcialmente antropizada (IBGE, 2022). Segundo Furtado e Ponte (2013, p. 60) "está embutida entre as áreas mais elevadas dos tabuleiros e chapadas, representados por sedimentos da bacia sedimentar do meio norte, que estão presentes no limite entre os estados do Pará e do Maranhão". Na área da bacia, a unidade corresponde a uma pequena porção na parte noroeste, abrangendo o município de Centro Novo do Maranhão, com 14,622 km$^2$ (Tabela 19) do total da extensão da área de estudo.

Quanto ao Planalto Dissecado do Gurupi-Grajaú, compreende a maior unidade geomorfológica da bacia com 26.920,026 km$^2$, localizada no setor centro-ocidental do estado do Maranhão (Dantas *et. al.,* 2013). Corresponde à região geomorfológica Baixos Planaltos e Chapadas dos Altos Rios Gurupi, Grajaú e Mearim, caracterizando-se principalmente por topos planos em posição interfluvial, limitados por escarpas, abrangendo restos de uma chapada que foram isolados pela dissecação e mantido por nível de canga (IBGE, 2022). Representa um conjunto de "superfícies tabulares elevadas por epirogênese e bruscamente delimitadas em rebordos erosivos, por onde se encaixam vales incisos e aprofundados apresentando desnivelamentos locais, por vezes, superiores a 100 m" (Dantas *et. al.,* 2013, p. 49). Essa unidade abrange toda a parte centro-sul da bacia, formando um quadrante indo de São João do Caru até Brejo de Areia, e de Senador La Rocque a Montes Altos.

As Planícies e Terraços Fluviais, de região geomorfológica Formas Agradacionais Atuais e Subatuais Interioranas, correspondem a várzeas e terraços aluviais elaborados em depósitos sedimentares holocênicos (IBGE, 2022). Ocorrentes em grande escala ao longo dos principais rios, onde se apresentam como trechos descontínuos de planície fluvial (Apf) (IBGE, 2022). Na folha SB.23, planícies e terraços fluviais foram mapeados ao longo dos rios Itapecuru, Mearim, Pindaré, Turiaçu, Maracaçumé, Gurupi e Tocantins, bem como no Rio Parnaíba e afluentes principais (IBGE, 2022). Corresponde ao caminho do curso de drenagem principal indo desde Alto Alegre do Pindaré até o município de Monção.

A Superfície Dissecada de Santa Luzia do Paruá, presente na região geomorfológica Depressão Maranhense, corresponde essencialmente a uma superfície dissecada, na qual predominam colinas de declives suaves a medianos. Está associada a sedimentos areno-argilosos cretáceos da Formação Itapecuru e apresenta solos Podzólicos Vemelho-Amarelos epiconcrecionários e Areias Quartzosas, sob vegetação de floresta densa, com intensa atividade antrópica (IBGE, 2022). Na área da bacia, abrange os municípios de São João do Caru, Zé Doca, Governador Newton Belo, Centro Novo do Maranhão, Alto Alegre do Pindaré e Pindaré Mirim.

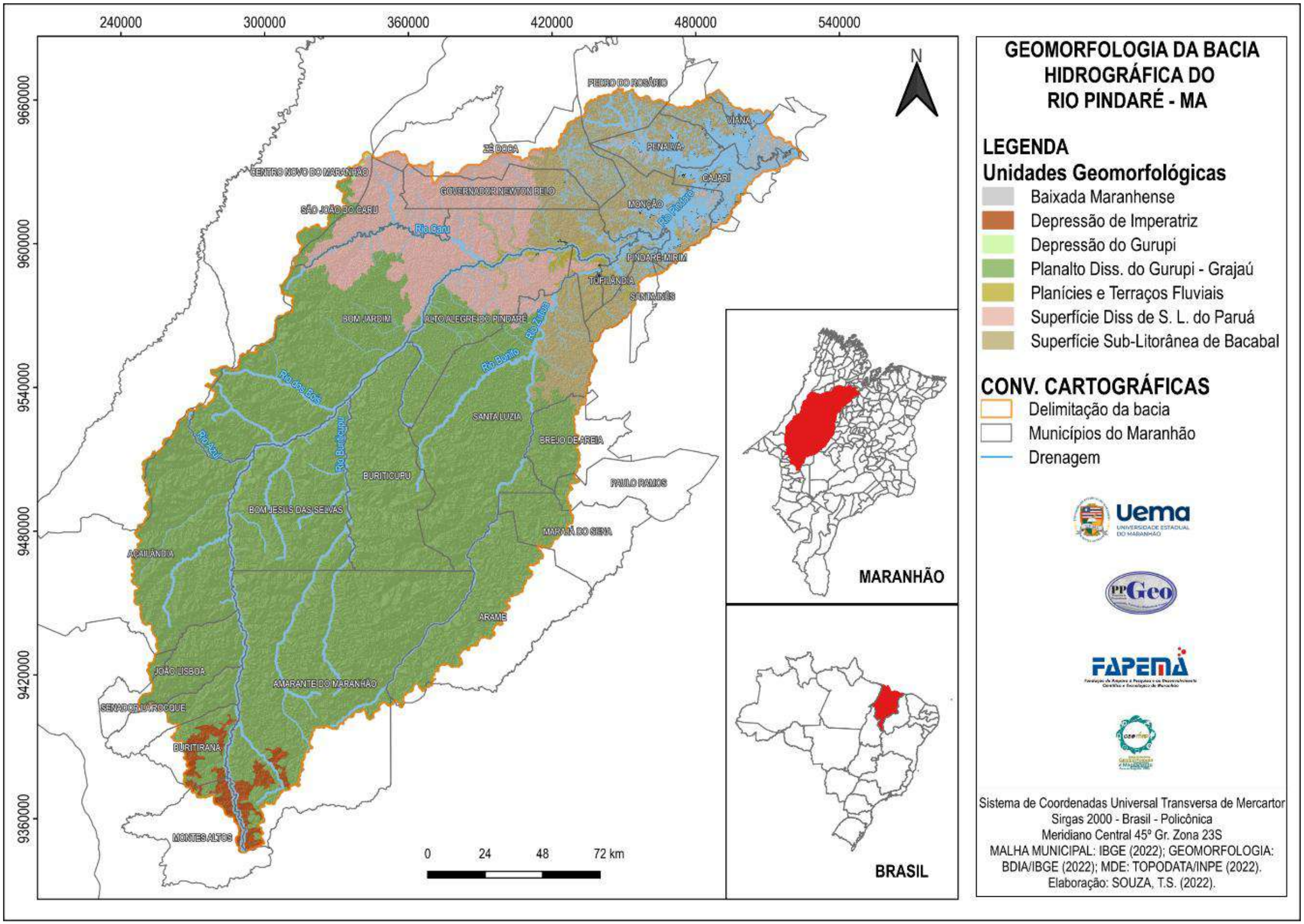
No que diz respeito à Superfície Sublitorânea de Bacabal, ela está presente na região geomorfológica Superfície dos Baixos Rios Pindaré-Mearim e Itapecuru, caracterizando-se pela presença de uma grande região de colinas que contornam a Baixada Maranhense, com declives que variam de suaves a médios. Em partes de esparsos, observam-se relevos aplainados (IBGE, 2022). Na BHRPind, corresponde aos municípios de Matinha, Penalva, Governador Newton Bello, Pindaré Mirim, Santa Inês, Alto Alegre do Pindaré e Tufilândia.

**Tabela 19** – Unidades Geomorfológicas da bacia hidrográfica do Rio Pindaré e suas respectivas concentrações

| Unidade Geomorfológica | Área em ($km^2$) | Área em % |
|---|---|---|
| **Baixada Maranhense** | 959,892 | 2,38% |
| **Corpo d'água continental** | 605,4 | 1,50% |
| **Depressão de Imperatriz** | 764,879 | 1,89% |
| **Depressão do Gurupi** | 14,622 | 0,04% |
| **Planalto Dissecado do Gurupi – Grajaú** | 26.920,026 | 66,63% |
| **Planícies e Terraços Fluviais** | 855,436 | 2,12% |
| **Superfície Dissecada de Santa Luzia do Paruá** | 4.930,488 | 12,20% |
| **Superfície Sublitorânea de Bacabal** | 5.351,215 | 13,24% |
| **Total** | 40.401,96 | 100,00% |

Fonte: IBGE (2022). Organizada pelo pesquisador (2022).

**Figura 12** – Mapa de geomorfologia da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2022).

## 4.6 Dissecação do Relevo

O índice de dissecação do relevo (Figura 13), sendo classificado de acordo com a proposta alternativa de Ross (1994), abrangeu um total de quatro classes: Fraca, Moderada, Forte e Muito Forte, sendo a menor unidade, a Muito Fraca, não evidente na área da bacia hidrográfica do Rio Pindaré.

A dissecação do relevo classificada como ‘Fraca’ abrangeu a maior parte da área, com 25.714,656 km$^2$ (Tabela 20), correspondendo a mais de 63% do total da área da bacia. Ela constitui grande parte dos municípios a norte e nordeste da bacia, indo de Governador Newton Bello até a parte norte do município de Santa Luzia.

A dissecação Moderada corresponde ao menor percentual de área na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, correspondendo a um total de apenas 3,53%. Ela se encontra espalhada e sem grandes aglomerações, sendo Bom Jardim, Amarante do Maranhão e Senador La Rocque os municípios com maior ocorrência de tal dissecação.

A dissecação Forte abrangeu 3.365,817 km$^2$, correspondendo a 8,33% do total da área da bacia. Ela está situada principalmente nos municípios de Buriticupu, Bom Jesus das Selvas, Açailândia e Bom Jardim, de encontro à classificação ‘Muito Forte’.

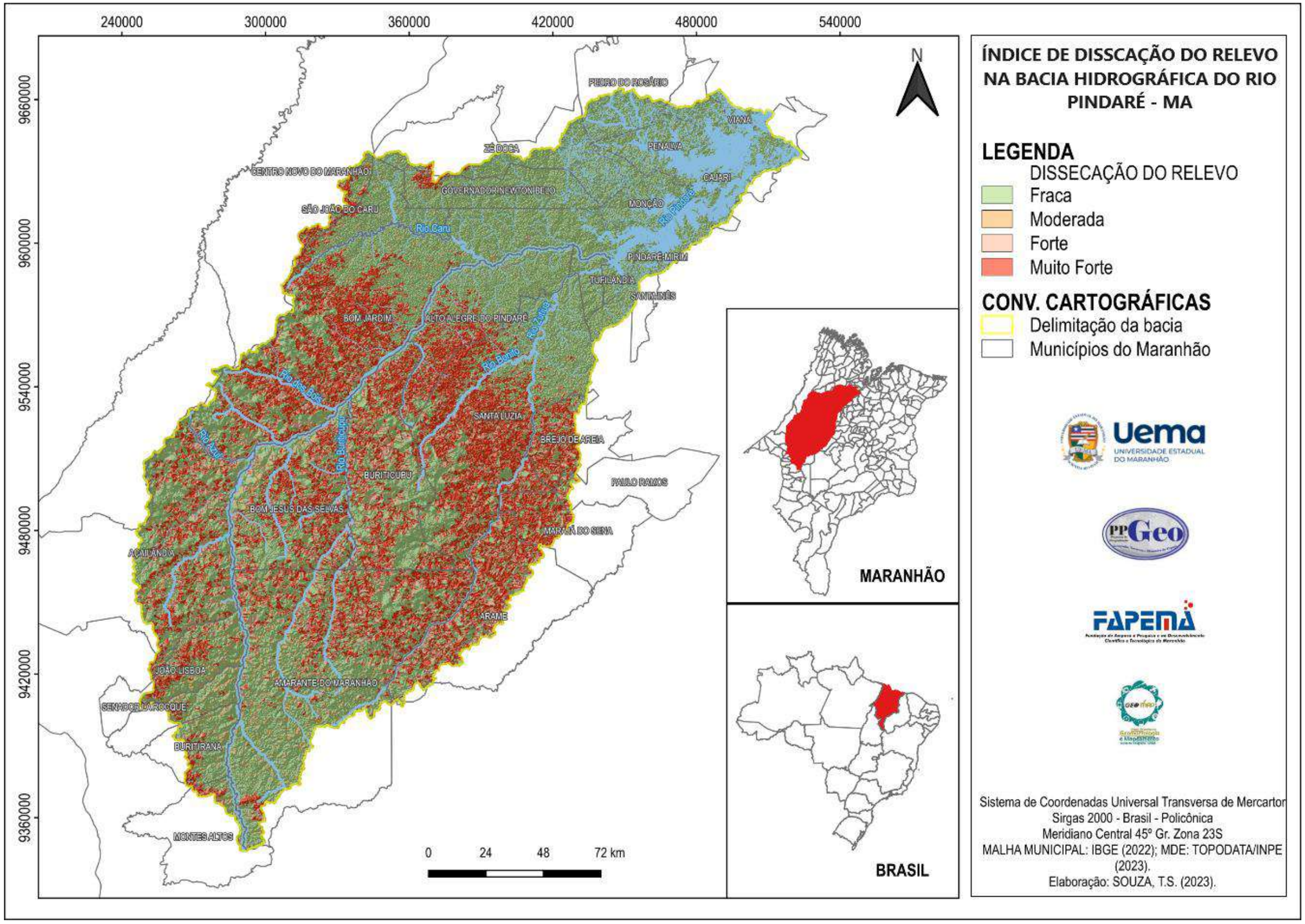
Como classificação com a segunda maior extensão, a dissecação ‘Muito Forte’ abrangeu principalmente os municípios centrais da bacia, formando um corredor de intensidade que vai de Bom Jardim, passando por Santa Luzia e Brejo de Areia, até Marajá do Sena. Tal dissecação corresponde a mais de 24% da área da bacia, um total de 9.894,020 km$^2$.

**Tabela 20** – Dissecação do relevo na bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA

| **Dissecação** | **Área (Km$^2$)** | **Área (%)** |
|---|---|---|
| **Fraca** | 25.714,656 | 63,65% |
| **Moderada** | 1.427,467 | 3,53% |
| **Forte** | 3.365,817 | 8,33% |
| **Muito Forte** | 9.894,02 | 24,49% |
| **Total** | 40.401,96 | 100% |

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2023)

**Figura 13** – Mapa do Índice de Dissecação do relevo da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2022).

## 4.7 Declividade

A declividade, de modo geral, é um dos parâmetros essenciais como indicador de vulnerabilidade ambiental. Segundo a EMBRAPA (2018, p. 294) “as fases do relevo qualificam condições de declividade, comprimento de encostas e configuração superficial dos terrenos, que afetam as formas de modelado (formas topográficas) de áreas de ocorrência das unidades de solo”. Assim, a declividade compreende um inter-relação entre o solo e as fases do relevo, ou seja, sua modelagem, na qual “as distinções são empregadas para prover informação sobre a praticabilidade de emprego de equipamentos agrícolas, principalmente os mecanizados, e facilitar inferências sobre suscetibilidade dos solos à erosão” (EMBRAPA, 2018, p. 294).

A bacia hidrográfica do Rio Pindaré, para este estudo, foi analisada de acordo com as classes de avaliação morfodinâmica, com base na própria classificação dos ambientes em categorias ecodinâmicas de Tricart (1977). Essas classes foram classificadas de acordo com o Manual Técnico de Geomorfologia[6], fornecido pelo IBGE (2009), e são apresentadas a seguir.

Na classificação ‘Muito Fraca’, na BHRPind, ela está presente quase que exclusivamente na foz, principalmente nas proximidades de acúmulo de massas de água, abrangendo municípios como Viana, Penalva e Cajari (Figura 14). Corresponde a 7341,850 $km^2$ do total da área da bacia (Tabela 21), estando associada a formações superficiais espessas, com topos planos de chapadas, onde os efeitos do escoamento superficial não são visíveis (IBGE, 2009).

Caracterizando-se com declividade entre 3% a 8%, a classificação ‘Fraca’ dispõe “de densidade de drenagem grosseira e fraco aprofundamento da drenagem, onde o processo de escoamento subsuperficial provoca a perda de materiais finos em superfície com empobrecimento dos solos” (IBGE, 2009, p. 115). Na área, essa classificação é predominante na porção norte, tendo pequenos resquícios por toda a bacia, estando presente em larga escala nos municípios de Governador Newton Belo, Monção e partes de Pedro do Rosário e Zé Doca, correspondendo a um total de 11.339,241 $km^2$ da área total da bacia.

O relevo ‘Moderado’, representado pelo intervalo de 8 a 20% de declividade, ocupa áreas do centro-sul da bacia, estando ligeiramente ligado às bordas dos cursos d’água, predominante em Amarante do Maranhão, Alto Alegre do Pindaré, Bom Jesus das Selvas, Buriticupu, entre outros.

[6]Proposta alternativa ao Sistema de Classificação do Solos – SIBCS (EMBRAPA, 2018).

Correspondente a declividade de 20 a 45%, o relevo ‘Forte’ apresenta formações superficiais pouco espessas e/ou rasas, com textura média e/ou arenosa (IBGE, 2009), encontrando-se presente na porção central da bacia, onde ocorrem áreas de maior elevação, principalmente entre os municípios de Santa Luzia e Bom Jardim. Representa mais de 7.232 $km^2$ do total da área da bacia.

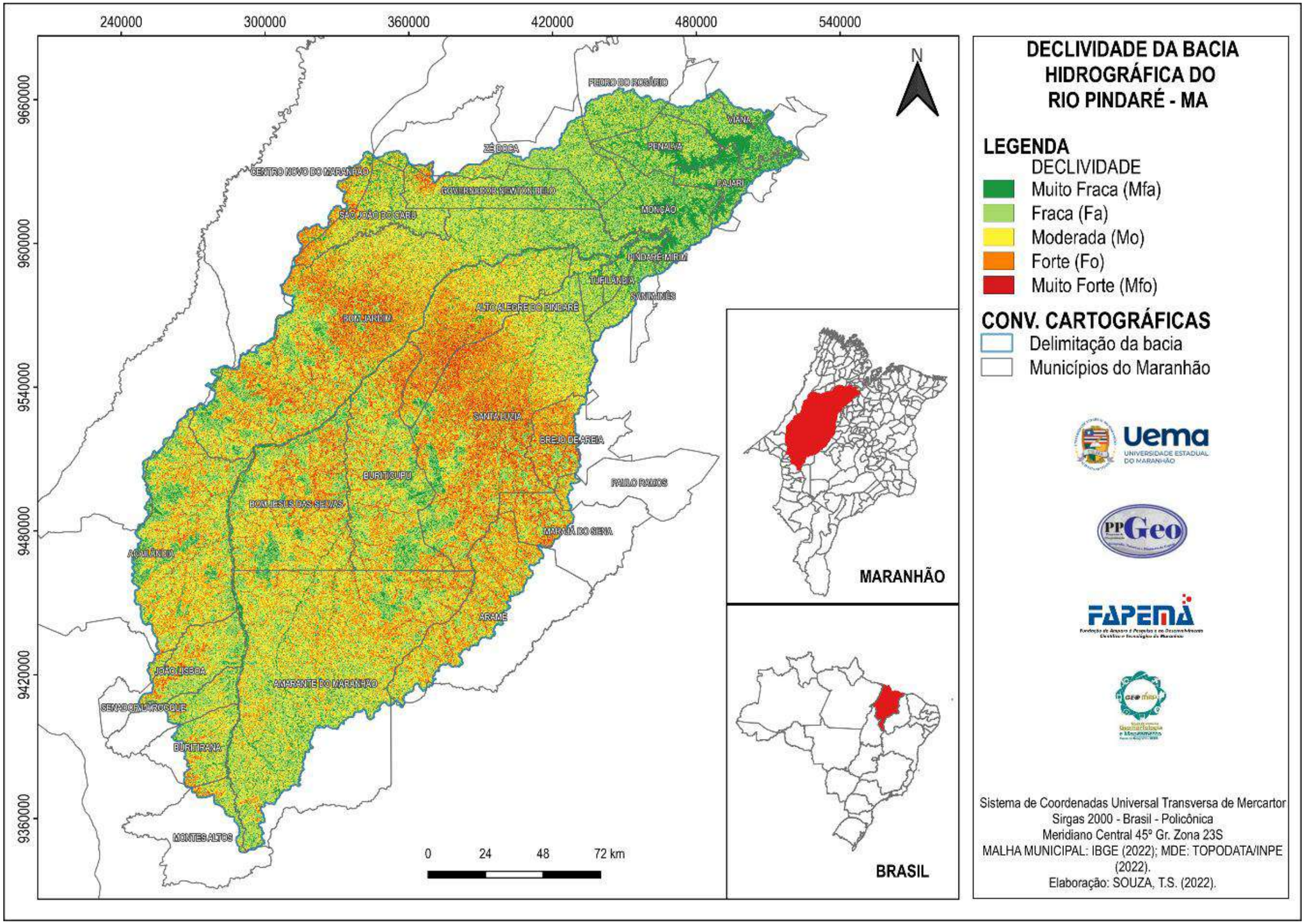
O relevo ‘Muito Forte’, caracterizado por declividades superiores a 45%, na área da bacia, representa um total de 1.292,058 $km^2$, sendo o relevo de menor quantidade espacial. Segundo o IBGE (2009, p. 115), “nesses relevos há um predomínio da morfogênese sobre a pedogênese, caracterizando essas áreas como meios instáveis”. Na BHRPind, esse relevo também se apresenta na porção central, estando alinhado entre os municípios de Bom Jardim, Alto Alegre do Pindaré e Santa Luzia.

**Tabela 21** – Declividade e formas de relevo da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA

| Formas de Relevo | Declividade (%) | Área ($km^2$) | Área (%) |
|---|---|---|---|
| **Muito Fraca (Mfa)** | 0-3 | 7.341,85 | 18,17% |
| **Fraca (Fa)** | 3-8 | 11.339,241 | 28,07% |
| **Moderada (Mo)** | 8-20 | 13.196,17 | 32,66% |
| **Forte (Fo)** | 20-45 | 7.232,638 | 17,90% |
| **Muito Forte (Mfo)** | 45-75 | 1.292,058 | 3,20% |
| **Total** | - | 40.401,96 | 100,00% |

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2022).

**Figura 14** – Mapa clinográfico da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA




Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

## 4.8 Vulnerabilidade da geomorfologia das unidades de paisagem

Quanto à vulnerabilidade geomorfológica, dentro dos valores de vulnerabilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, observou-se uma maior estabilidade nos municípios de Viana, Penalva, Monção, Pindaré Mirim, Tufilândia e Santa Inês (Figura 15). Esse resultado decorre do fato de que tais municípios correspondem à foz da bacia, e proporcionalmente a relevos planos e suave ondulados.

As bordas dos cursos de drenagem nos municípios ao sul da bacia, como Amarante do Maranhão, Buritirana, Montes Altos, Senador Larocque, Açailândia, entre outros, correspondem a relevos moderadamente estáveis, bem como a áreas moderadamente estáveis/vulneráveis, estando associados principalmente a relevos ondulados e fortemente ondulados, com declives mais suscetíveis à morfogênese, decorrente de processos erosivos.

Na região central da bacia, correspondente aos municípios de Bom Jardim, alto Alegre do Pindaré, Santa Luzia e Brejo de Areia, apresentam os maiores valores de vulnerabilidade aos parâmetros de declividade, sendo associada a relevos montanhosos, com nomenclaturas de serras, além de apresentar um alto grau de entalhamento e amplitude interfluvial.

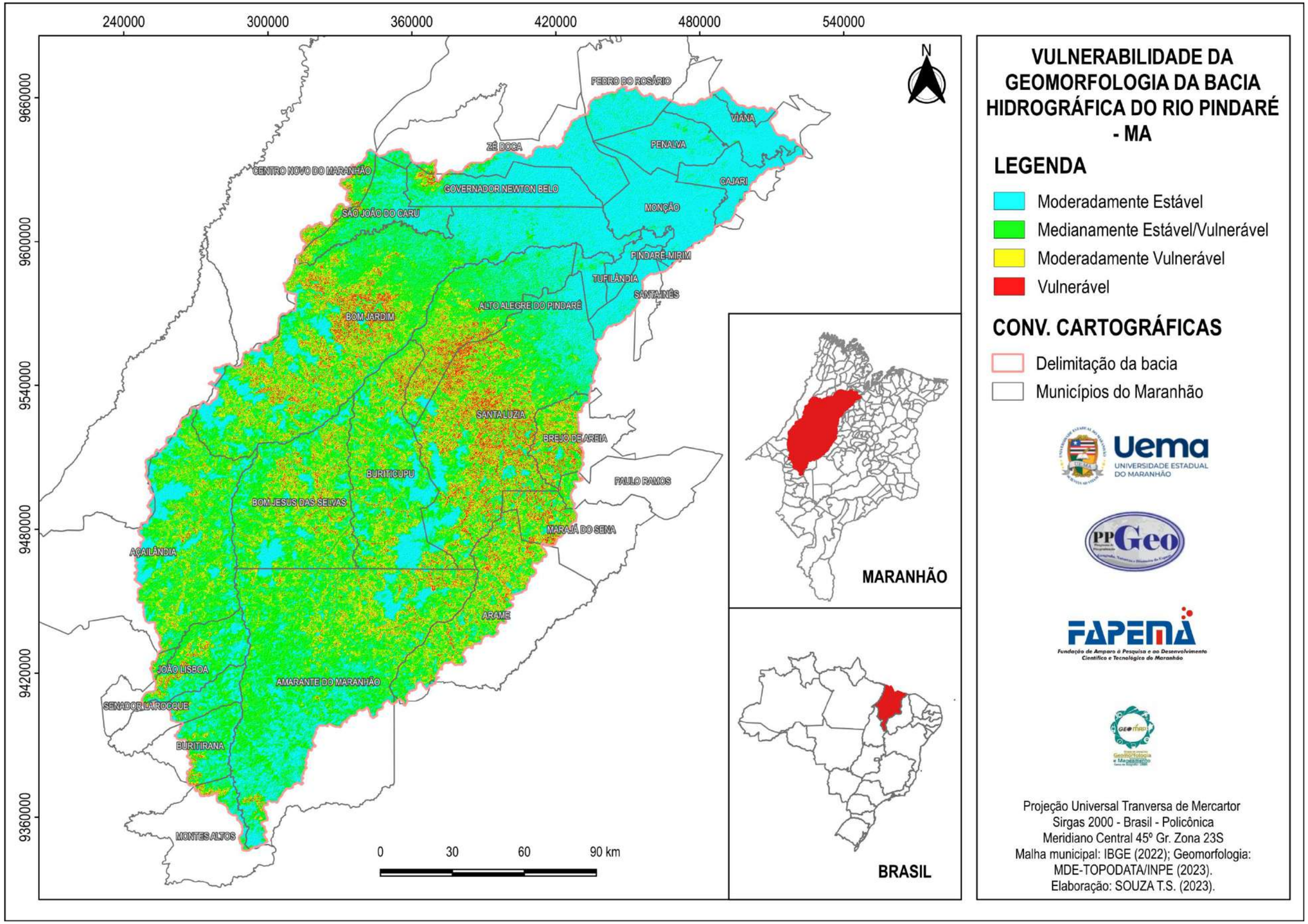
Sobre a espacialização, observou-se que a parte central concentrou os valores mais altos de vulnerabilidade, com a classe ‘Vulnerável’ correspondendo a um total de 13,547 km$^2$ (Tabela 22). Já as áreas mais estáveis estão localizadas na parte norte, sendo a classe ‘Moderadamente Vulnerável’ abrangendo 36.238,363 km$^2$.

**Tabela 22** – Vulnerabilidade da geomorfologia das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré

| Vulnerabilidade | Área (Km$^2$) | Área em % |
|---|---|---|
| **Moderadamente Estável** | 36.238,363 | 89,69% |
| **Medianamente Estável/Vulnerável** | 3.777,283 | 9,35% |
| **Moderadamente Vulnerável** | 372,767 | 0,92% |
| **Vulnerável** | 13,547 | 0,03% |
| **Total** | 40.401,96 | 100% |

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2023).

**Figura 15** – Vulnerabilidade da geomorfologia das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2023).

## 4.9 Intensidade Pluviométrica

A Intensidade Pluviométrica, medida pela divisão entre a Precipitação Média Anual (Tabela 23) e a média por trinta do número de dias com chuva, é representada em mm/mês. A bacia hidrográfica do Rio Pindaré representou múltiplas variações no decorrer dos trinta anos analisados.

No ano de 1991 (Figura 16), observou-se um alto teor pluviométrico na área da BHRPind, variando de 334, 43 a 848,01 mm. Essa alta intensidade pluviométrica foi mais evidente no município de Arame, localizado na parte sudeste da bacia. A menor intensidade, com intervalos de 334,43 a 558,14 mm, foi registrada de Buriticupu até os municípios próximos à foz, como Penalva, Viana, Cajari, entre outros. Na porção sul da bacia, tem-se o intervalo de intensidade consideravelmente alto, desde Montes Altos até Bom Jesus das Selvas e Buriticupu.

No início do século XXI, no ano de 2001, observou-se uma expressiva baixa no índice de intensidade pluviométrica, com o valor de 338,03 mm como a maior intensidade no referido ano, apenas 3,6 mm superior à menor intensidade do ano de 1991. Neste ano, o município de Arame, assim como pequenas extensões dos municípios vizinhos, passou a registrar a menor intensidade de chuva, variando entre 262,98 a 269,83 mm, enquanto a região de Montes Altos até Viana apresentou os maiores níveis.

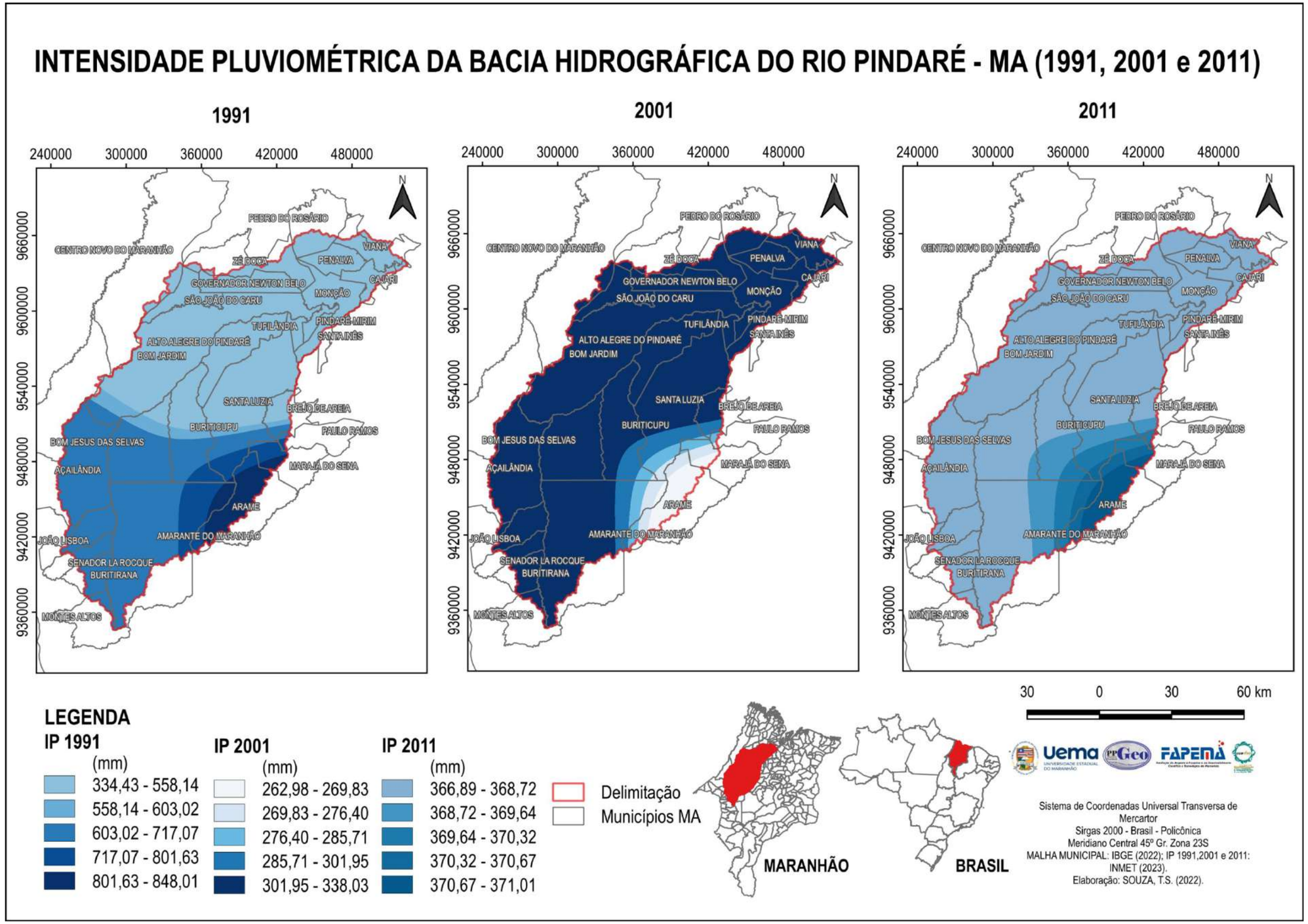
Já no ano de 2011, observou-se o menor intervalo de intensidade pluviométrica, variando entre 366,89 mm e 371,01 mm. A menor intensidade abrangeu a extensão de Montes Altos a Viana, enquanto a maior foi registrada no município de Arame.

**Tabela 23** – Precipitação Média Anual das estações analisadas para a BHRPind

| ESTAÇÕES | 1991 | 2001 | 2011 |
|---|---|---|---|
| | P.M.A | P.M.A | P.M.A |
| **Zé Doca** | 1585,2 | 1882,8 | 1981,2 |
| **Imperatriz** | 1373,6 | 1437,4 | 1756,7 |
| **Barra do Corda** | 940,5 | 1045,6 | 1473,2 |

Fonte: INMET (2023). Organizada pelo pesquisador (2023).

**Figura 16** – Mapa de Intensidade Pluviométrica da bacia hidrográfica do Rio Pindaré/ MA (1991 - 2021)



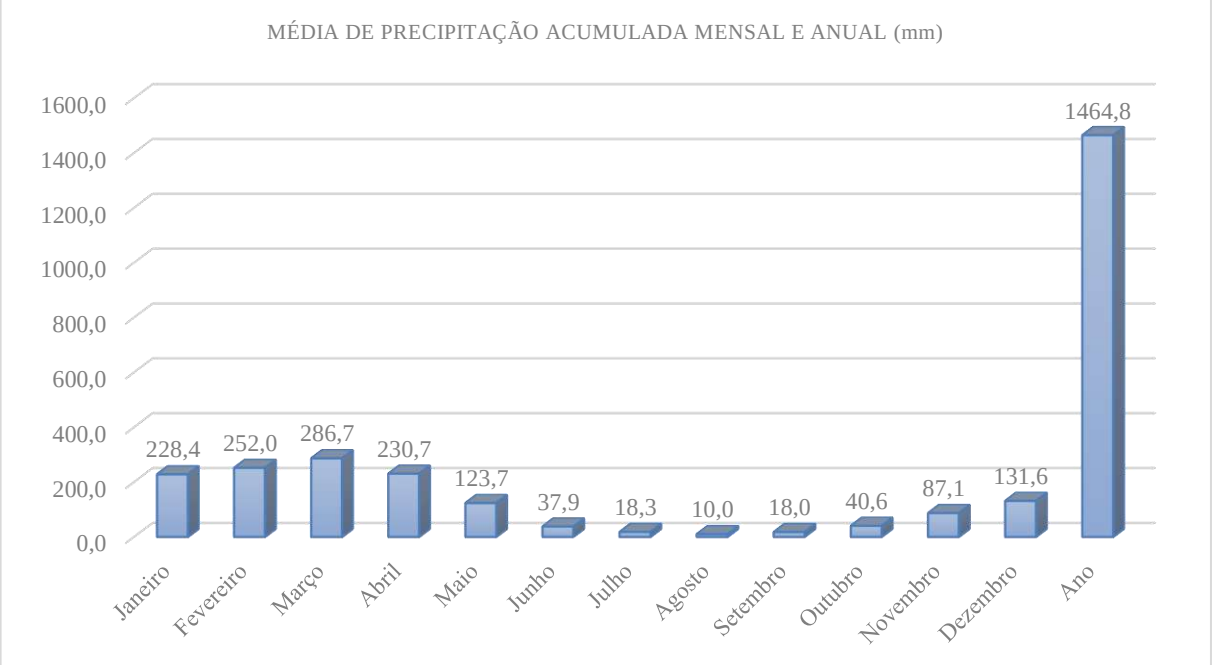

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2023).

Para o ano de 2021 (Figura 18), a intensidade pluviométrica variou entre 361,97 mm e 473,60 mm. No referido ano, os municípios centrais e ao norte da bacia apresentaram as menores intensidades de chuva da faixa temporal, correspondendo uma área triangular entre Bom Jardim, Brejo de Areia e Viana, com intervalo de 361,97 a 410,80 mm. No final da parte central, a partir de Buriticupu, as intensidades foram maiores, variando de 420 a 448,08 mm, correspondendo um corredor que se estende desde Bom Jardim até Brejo de Areia, na parte leste da bacia.

A parte sul da bacia, com grandes extensões no município de Amarante do Maranhão e Açailândia, abrange as áreas com a maior intensidade pluviométrica, correspondendo um intervalo de 448,08 a 473,60 mm.

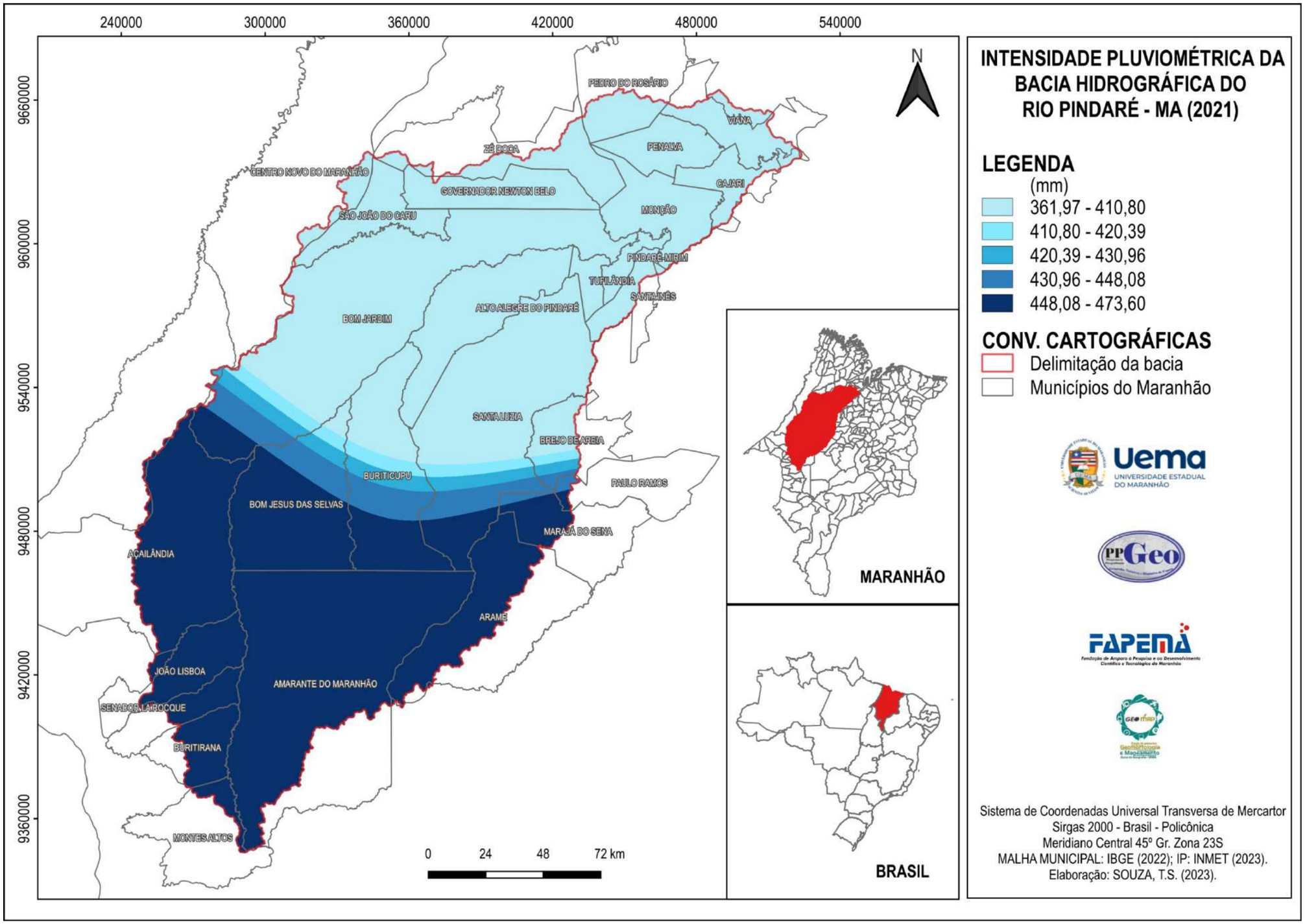
Além disso, ao realizar um panorama geral das faixas temporais analisadas, considerando os dados da Normal Climatológica (1991 – 2020), (com apenas um ano de diferença), observa-se na Figura 17, a dinâmica de precipitação acumulada mensal e anual em mm obtida a partir da média dos dados das estações convencionais de Barra do Corda, Imperatriz e Zé Doca. A análise revela que, em média, nos primeiros seis meses do ano ocorre o período chuvoso, com março sendo o mês de alta, com 286,7 mm. Em agosto, inicia-se o período seco, com mudança a partir de dezembro, subindo de 10 mm para 131,6 mm.

**Figura 17** – Média do comportamento das precipitações (Normal Climatológica 1991 - 2020)




Fonte: INMET (2023). Organizada pelo pesquisador (2023).

**Figura 18** – Mapa de intensidade pluviométrica da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA (2021)




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2023).

## 4.10 Vulnerabilidade do clima das unidades de paisagem dos anos de 1991, 2001 e 2011

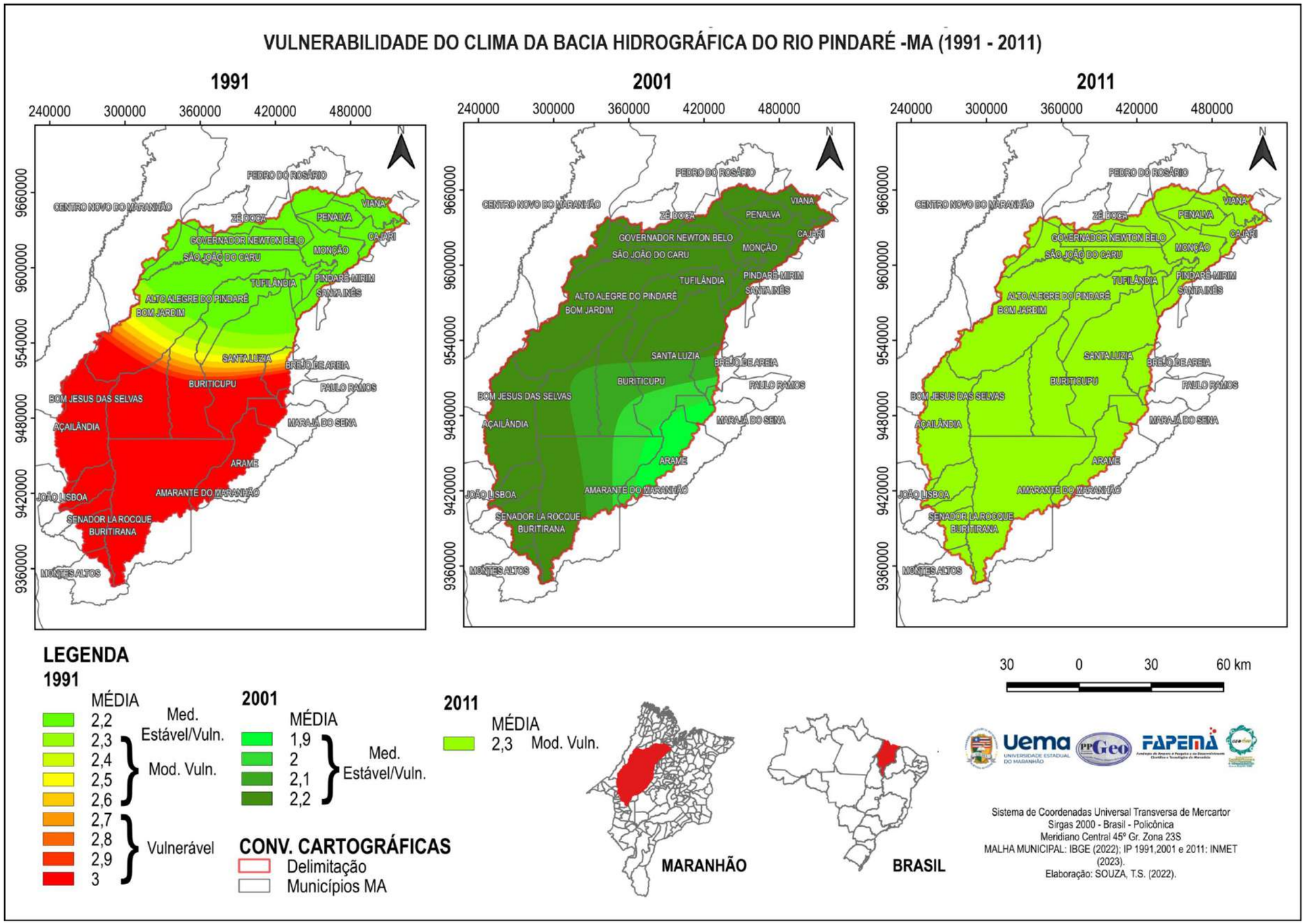
O elemento clima, na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, é um componente essencial para o entendimento da dinâmica de chuvas na região. Isto ocorre porque, por ser parte da região amazônica, a intensidade pluviométrica se torna um fator determinante para a vulnerabilidade relacionada a processos erosivos.

No ano de 1991, quanto à vulnerabilidade à intensidade pluviométrica, a bacia hidrográfica do Rio Pindaré apresentou múltiplos graus, variando entre estabilidade e instabilidade. As áreas ao norte da bacia, próximas à foz, representaram o menor grau de vulnerabilidade, com uma média de 2,2, sendo classificadas como áreas 'medianamente estáveis/vulneráveis'. Tais áreas incluem os municípios de Viana, Cajari, Penalva, Monção, Zé Doca, Tufilândia, entre outros (Figura 19).

Na parte central, observam-se variações no grau 'moderadamente vulnerável', entre 2,3 e 2,6. Os municípios de principal abrangência são Bom Jardim, Buriticupu, Tufilândia, Santa Luzia e Brejo de Areia. Ao sul, os municípios Amarante do Maranhão, Açailândia, Senador La Rocque, João Lisboa, Bom Jesus das Selvas, Buriticupu e Arame, apresentaram a maior taxa de vulnerabilidade no ano de 1991, sendo os mais propensos a processos erosivos.

Já em 2001, na área da bacia hidrográfica do Rio Pindaré apresentou a predominância do grau 'medianamente estável/vulnerável' em todo perímetro de extensão, com variações apenas na média desse grau, que variam entre 1,9, 2,0, 2,1 e 2,2. Assim, como o ano de 2001, o ano de 2011 apresentou uma única classificação, a de 'moderadamente vulnerável', com o grau único de 2,3 em toda a extensão da área da bacia.

**Figura 19** – Vulnerabilidade do clima das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré (1991 - 2011)




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2022).

## 4.11 Vulnerabilidade do clima das unidades de paisagem do ano de 2021

A vulnerabilidade do clima no ano de 2021 (Figura 21), em parâmetros gerais, demonstrou-se instável quanto às perspectivas de impactos ambientais. O mesmo ano, comparado ao primeiro ano da faixa temporal analisada, 1991, corresponde a uma menor vulnerabilidade à intensidade pluviométrica. Em 1991, a intensidade de chuvas na região variava entre 300 e mais de 800 mm mensais, enquanto em 2021, o intervalo variou entre 360 e 470 mm, o que indica uma diminuição na intensidade pluviométrica nos últimos trinta anos.

Entretanto, o considerável aumento nos padrões de pastagem, solo exposto e múltiplos usos de agricultura, influenciaram diretamente no processo de desertificação, que alinhado à intensidade pluviométrica do ano de 2021, consequentemente, facilitam o aparecimento de voçorocas (Figura 20) e outras formas de deslizamentos, e por efeito dominó, também tornando a área da bacia vulnerável ao fator clima.

**Figura 20 –** Voçoroca localizada no povoado de Arara, município de Santa Luzia

Fonte: Arquivo pessoal (2021).

Com isso, em 2021, observou-se na bacia hidrográfica do Rio Pindaré altos padrões de vulnerabilidade ambiental, variando entre ‘moderadamente vulnerável’ e ‘vulnerável’. A classificação ‘moderadamente vulnerável’, apresentou-se da parte central ao norte da bacia, com área total de 23.878,29 km$^2$ (Tabela 24), incluindo desde Bom Jardim e Santa Luzia até os municípios da Baixada Maranhense, dentro dos limites da BHRPind. Já a classificação

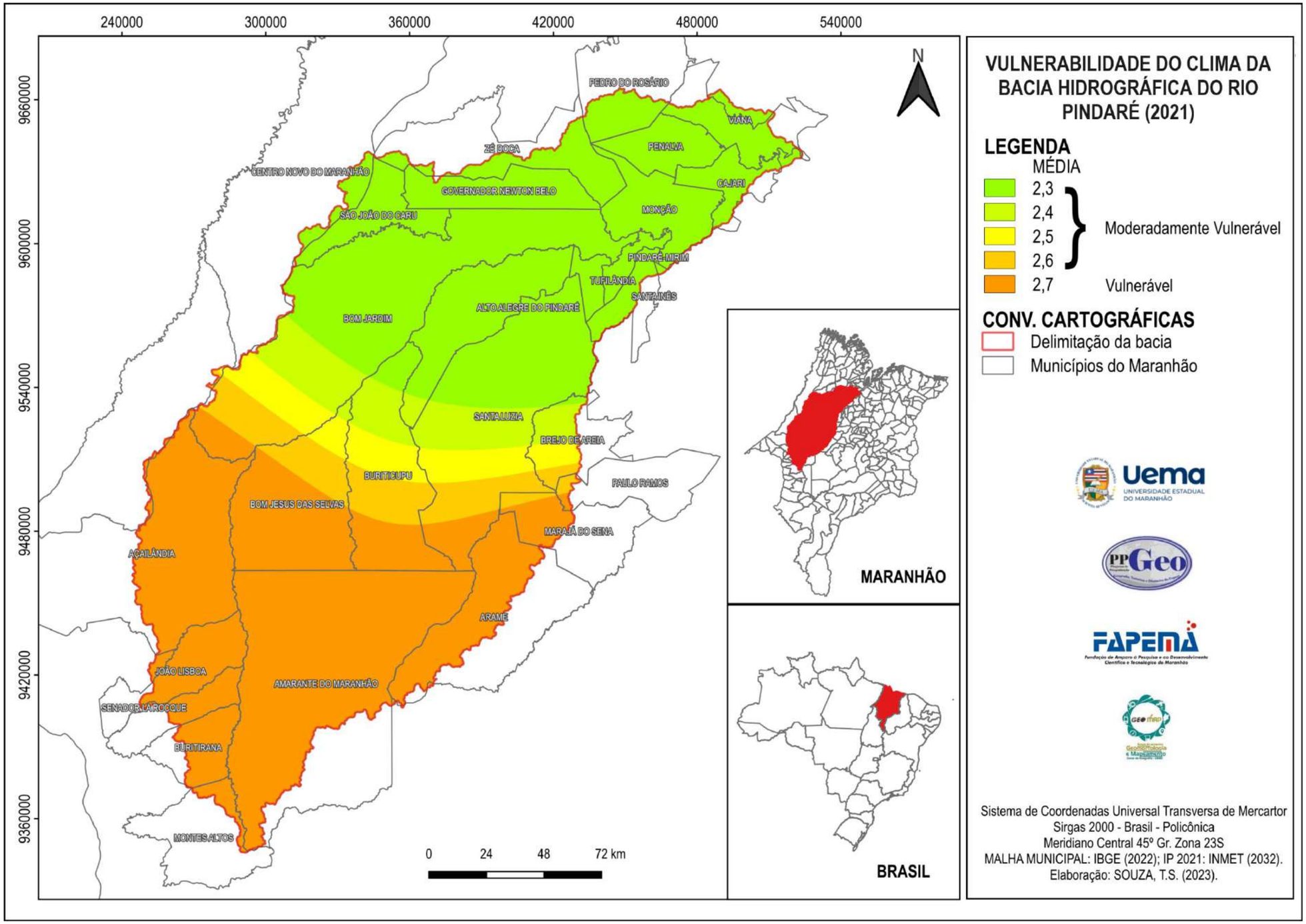
‘vulnerável’ encontrou-se presente na região mais ao sul da bacia, com 40,90% de sua área total, correspondendo a 16523,67 km$^2$. Entre os principais municípios de abrangência estão Amarante do Maranhão, Açailândia, Bom Jesus das Selvas e Arame.

**Tabela 24** – Vulnerabilidade do clima das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA

| **Vulnerabilidade** | **Área (Km$^2$)** | **Área em %** |
|---|---|---|
| **Moderadamente Vulnerável** | 23878,29 | 59,10% |
| **Vulnerável** | 16523,67 | 40,90% |
| **Total** | 40401,96 | 100,00% |

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2023).

**Figura 21** – Vulnerabilidade do clima das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré (2021)




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2022).

## 4.12 Uso e cobertura da terra

O uso e cobertura atual da bacia hidrográfica do Rio Pindaré foram definidos a partir das classificações propostas pelo Projeto Terraclass Amazônia, Leite e Rosa (2012), e pelo Manual Técnico de Uso da Terra do IBGE (2013). Essa análise identificou as áreas de corpo d'água, pastagem, agricultura, áreas urbanizadas, áreas não florestadas, silvicultura e floresta (Figura 22).

A água representa um fator essencial para o desenvolvimento social e para a manutenção da vida. Quando os processos relacionados a ela envolvem riscos e vulnerabilidade, representam intenso problema não somente para o contexto ambiental, mas para a sociedade que dela necessita. Segundo Neto (2015, p. 3):

> A água é importante para a vida de todos os organismos, pois desempenha diversas funções essenciais: transporta substâncias indispensáveis à vida, mantém as células com o tamanho e forma adequados, faz parte de todos os líquidos orgânicos (sangue, urina, suor, etc); regula a temperatura do corpo e intervém em todas as transformações que ocorrem no interior do organismo.

Os cursos de água, de formação dendrítica, correspondem grande parte da área da bacia do Rio Pindaré, sendo caracterizados como rios com grande potencial para o uso não consultivo, pesqueiro e de lazer, e também para o consultivo, servindo de fonte de água para irrigação e dessedentação animal. Nos últimos anos, a evolução da pastagem na área caracteriza grande processo de assoreamento nas proximidades dos cursos, atrelado principalmente ao pisoteio do gado, à proximidade com áreas urbanas e à retirada da mata ciliar.

**Figura 22** – (A) Área urbana nas proximidades do curso d'água, município de Cajari; (B) Lago Viana, município de Viana

Fonte: Arquivo pessoal (2021).

### I. Uso e cobertura (1991)

O uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, no ano de 1991, se caracterizava por grandes extensões de formações florestais, apesar do crescente processo de inserção agrícola na região, com o plantio de pastagem e solos expostos pela pecuária bovina (Figura 23).

As classes de uso 'Outras Lavouras Temporárias', Apicum, Silvicultura e a Mineração correspondem às de menores proporções na área da bacia, abrangendo menos de 1% da área (Tabela 25).

Ao norte, exclusivamente, encontrava-se a presença de classes de Mangue, ainda em pequena proporção, abrangendo um total de 4,118 $km^2$ da área da bacia, correspondendo às duas margens do curso principal próximo à foz, respectivamente nos municípios de Viana, em maior quantidade, e Cajari, em menor.

As áreas urbanizadas, ainda de pouca proporção na área de estudo, correspondiam a 25, 595 $km^2$, estando espalhadas pela área da bacia, principalmente devido à presença das sedes dos municípios, e de cidades com maior proporção, como Pindaré-Mirim, Zé Doca e Buriticupu.

Com maior evidência no município de Amarante do Maranhão, a classe 'outras áreas não vegetadas' corresponde a 91,783 $km^2$. Tal área representa um possível processo extrativista. Segundo o MapBiomas (2023), representam áreas de superfícies não permeáveis (infraestrutura, expansão urbana ou mineração) não mapeadas em suas classes.

O 'Mosaico de usos', correspondente principalmente a áreas de uso agropecuário, onde não se pode distinguir as classes de pastagem e agricultura; e áreas de vegetação urbana, incluindo vegetação cultivada e vegetação natural florestal e não-florestal (Mapbiomas, 2023), abrange um total de 122,538 $km^2$ na área da bacia, entre os municípios de Buritirana, Amarante do Maranhão e Arame.

Dispostas em grande quantidade próximas à foz, também foram identificadas as formações Campestre e Savânica, além dos Campos Alagados e Áreas Pantanosas. A primeira, a Formação Campestre, abrange um total de 276, 475 $km^2$, estando presente nas margens do curso principal desde Alto Alegre do Pindaré até Cajari, tendo grande ocorrência também no município de Penalva. A segunda, a Formação Savânica, abrangeu um total de 1,03 % da área da bacia, correspondendo a quase 419 $km^2$. Além dos municípios de Viana e Cajari, próximos à foz, também foi identificada ao norte, nas cidades de Governador Newton Belo e Zé Doca, e ao sul, nos municípios de Montes Altos e Amarante do Maranhão. A terceira, os Campos Alagados e Áreas Pantanosas, corresponderam grande parte dos municípios de Viana, Penalva

e Cajari, onde se encontra o curso d'água mais caudaloso e propenso à existência de ambientes alagados, tendo tal classes um total de 501,209 km$^2$.

A pastagem, depois das formações de florestas naturais, corresponde a uma das classes de maior proporção na área da bacia hidrográfica do Rio Pindaré. Constituem-se como áreas com predominância do meio agropecuário, abrangendo mais de 10.000 km$^2$. Em 1991, incluiu grande parte do corredor entre Zé Doca e Santa Inês; parte do centro-sudoeste da bacia, entre João Lisboa, Açailândia, Bom jardim e Buriticupu; e porções delimitadas no Rio Zutiua, principalmente no município de Santa Luzia.

Como uma das classes de maior proporção em 1991, a Formação Florestal abarca, na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, grande parte das unidades de conservação, como a Reserva Biológica do Gurupi, e Terras Indígenas, como a Araribóia, de maior proporção. Assim, tal classe corresponde a um total de 28.347,405 km$^2$ no ano de 1991.

**Tabela 25** – Classes de uso e cobertura da terra na BHRPind no ano de 1991

| Classes | Área (km$^2$) | Área (%) |
|---|---|---|
| **Outras Lavouras Temporárias** | 0,006 | 0,00% |
| **Apicum** | 0,07 | 0,00% |
| **Silvicultura** | 0,086 | 0,00% |
| **Mineração** | 0,664 | 0,00% |
| **Mangue** | 4,118 | 0,01% |
| **Área Urbanizada** | 25,595 | 0,06% |
| **Outras Áreas não vegetadas** | 91,783 | 0,23% |
| **Mosaico de Usos** | 122,528 | 0,30% |
| **Formação Campestre** | 276,475 | 0,68% |
| **Rio, Lago e Oceano** | 339,269 | 0,84% |
| **Formação Savânica** | 418,111 | 1,03% |
| **Campo Alagado e Área Pantanosa** | 501,209 | 1,24% |
| **Pastagem** | 10.274,641 | 25,43% |
| **Formação Florestal** | 28.347,405 | 70,16% |
| **Total** | 40.401,96 | 100,00% |

Fonte: Mapbiomas (2023). Organizada pelo pesquisador (2023).

## II. Uso e cobertura (2001)

Já no século XXI, tem-se a análise do uso e cobertura da terra no ano de 2001 na bacia hidrográfica do Rio Pindaré (Figura 23). A classe Apicum, disposta na Tabela 26, a partir do início de tal década, se caracteriza como a menor unidade de uso e cobertura, correspondendo a uma área de 0,106 km$^2$ do total da área da bacia.

A soja, como um tipo de lavoura temporária caracterizada pelo "cultivo de plantas de curta ou média duração, geralmente com ciclo vegetativo inferior a um ano, que após a produção deixam o terreno disponível para novo plantio" (IBGE, 2013, p. 58), ganhou espaço a partir do ano de 2001, apesar de em pequena quantidade, com um total de 0,179 km$^2$. Além

da soja, a classe composta por ‘Outras Lavouras Temporárias’ correspondeu a um crescente desenvolvimento na área da bacia, passando de 0,006 para 2,1271 km$^2$, entre 1991 e 2001. Ademais, no ano de 2001 observou-se um crescimento nas áreas urbanizadas. Esse processo de urbanização está atrelado ao crescimento das cidades de Buriticupu e Pindaré-Mirim.

A pastagem, no início do século, obteve um crescimento exponencial na bacia hidrográfica do Rio Pindaré. Os municípios ao norte, como Zé Doca, Pindaré-Mirim, Tufilândia e Santa Inês, apresentaram, em grande parte de sua extensão, consideráveis áreas cobertas por pastagem, seja atrelada à pecuária ou à manutenção de terras agrícolas, com o plantio de vegetação rasteira, como o sorgo, por exemplo. Parte da região sudoeste da bacia, neste ano, encontrou-se coberta pela pastagem, acarretando a diminuição das áreas com vegetação de floresta natural, além do aumento da infertilidade do solo e dos impactos na fauna e flora.

Ainda nesse contexto, as áreas de formações florestais naturais, identificadas na bacia como Formação Florestal, passaram por um intenso processo de supressão em benefício da pastagem, reduzindo de mais de 28.000 km$^2$ para menos de 24.000 km$^2$ em um intervalo de apenas dez anos. Tal mudança é bastante evidente nos municípios de Buriticupu e Santa Luzia, com áreas que antes eram tomadas por formações florestais, mas que agora têm a pastagem como classe predominante.

Dentre todas as classes de uso e cobertura observadas no intervalo de dez anos, a Silvicultura apresenta o maior crescimento comparado ao ano de 1991. Atrelada principalmente ao cultivo do eucalipto, a silvicultura na região da bacia hidrográfica do Rio Pindaré representou mais de 31 km$^2$ em 2001, contra apenas menos de 1 km$^2$ em 1991.

**Tabela 26** – Classes de uso e cobertura da terra na BHRPind no ano de 2001

| Classes | Área (km$^2$) | Área (%) |
|---|---|---|
| **Apicum** | 0,106 | 0,00% |
| **Soja** | 0,179 | 0,00% |
| **Mineração** | 1,437 | 0,00% |
| **Outras Lavouras Temporárias** | 2,1271 | 0,01% |
| **Mangue** | 7,183 | 0,02% |
| **Silvicultura** | 31,761 | 0,08% |
| **Área Urbanizada** | 38,897 | 0,10% |
| **Mosaico de Usos** | 82,662 | 0,20% |
| **Outras Áreas não vegetadas** | 86,703 | 0,21% |
| **Formação Campestre** | 161,339 | 0,40% |
| **Rio, Lago e Oceano** | 521,318 | 1,29% |
| **Formação Savânica** | 287,048 | 0,71% |
| **Campo Alagado e Área Pantanosa** | 388,548 | 0,96% |
| **Pastagem** | 15.169,274 | 37,55% |
| **Formação Florestal** | 23.623,373 | 58,47% |
| **Total** | 40.401,96 | 100% |

Fonte: Mapbiomas (2023). Organizada pelo pesquisador (2023).

## III. Uso e cobertura (2011)

O uso e a cobertura da terra na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, no ano de 2011 (Figura 23), considerando os intervalos anteriores, já se encontrava em estado de intensa perturbação antrópica. Apesar de apresentar baixa em relação às classes de outras áreas não vegetadas, outras formações consideradas impactantes na área da bacia apresentaram exponencial crescimento no período de tempo analisado.

As lavouras temporárias, em geral, apresentaram um total de mais de 28 km$^2$ na área da bacia no respectivo ano (Tabela 27), contra menos de 3 km$^2$, dez anos antes, representando assim, uma redução das áreas com vegetação natural nativa e um aumento das áreas de monoculturas.

As áreas de silvicultura, presentes principalmente na região oeste da bacia, também apresentaram considerável crescimento, estando associadas ao cultivo de eucalipto para a produção de celulose. Os municípios de Açailândia e Bom Jardim correspondem, na BHRPind, às áreas com o avanço de tal empreendimento. Assim, segundo Oliveira (2019, p. 319):

> O avanço da produção agroflorestal tem promovido tipificações em microrregiões específicas, especialmente próximas aos limites da Amazônia Legal. E, como consequência, além dos impactos socioambientais [...], está-se constituindo uma nova fronteira agrícola na Amazônia Legal, que expressa o avanço de áreas com plantio de eucalipto entre o Maranhão, Pará e Tocantins.

A pastagem, uma das classes de uso mais predominante na bacia, alcançou seu ápice a partir do ano de 2011, ultrapassando, em extensão, a área das formações florestais presentes na BHRPind. Tal abrangência está associada principalmente à intensificação das utilizações referentes ao campesinato, às transições de processos agrícolas (principais causadores de infertilidade no solo), e ao pisoteio do gado em vegetações nativas, entre outras.

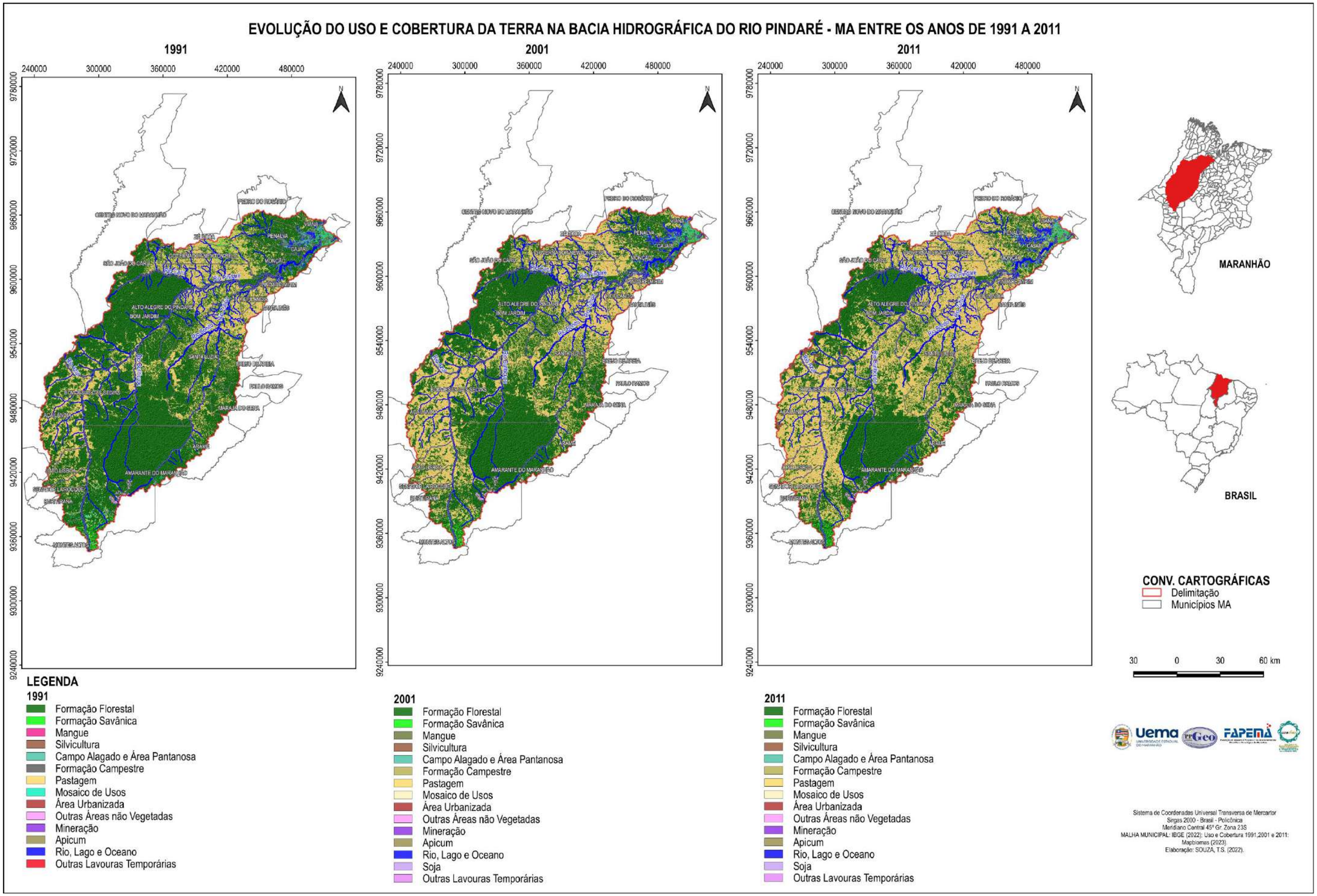
Essa alta na introdução da pastagem é evidente em grande parte dos municípios centrais cobertos pelos limites da bacia, onde se tem a predominância das formações florestais, correspondendo a unidades de conservação e terras indígenas. Assim, a pastagem no ano de 2011 encontrava-se com 19.935 km$^2$, enquanto que a formação florestal apresentou menor extensão que o último intervalo, com 18.703.

**Tabela 27** – Classes de uso e cobertura da terra na BHRPind em 2011

| Classe | Área (km²) | Área em % |
|---|---|---|
| **Apicum** | 0,028 | 0,00% |
| **Soja** | 1,063 | 0,00% |
| **Mineração** | 3,623 | 0,01% |
| **Mangue** | 6,351 | 0,02% |
| **Outras Lavouras Temporárias** | 28,552 | 0,07% |
| **Mosaico de Usos** | 36,068 | 0,09% |
| **Área Urbanizada** | 52,625 | 0,13% |
| **Outras Áreas não vegetadas** | 84,288 | 0,21% |
| **Formação Campestre** | 169,04 | 0,42% |
| **Silvicultura** | 194,812 | 0,48% |
| **Formação Savânica** | 283,513 | 0,70% |
| **Campo Alagado e Área Pantanosa** | 402,547 | 1,00% |
| **Rio, Lago e Oceano** | 500,284 | 1,24% |
| **Formação Florestal** | 18.703,836 | 46,29% |
| **Pastagem** | 19.935,334 | 49,34% |
| **Total** | 40.401,96 | 100% |

Fonte: Mapbiomas (2023). Organizada pelo pesquisador (2023).

**Figura 23** – Mapa de uso e cobertura da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA (1991 - 2011)




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2022).

## IV. Uso e cobertura (2021)

A pastagem, um dos tipos de uso mais ocorrentes da bacia, caracteriza-se principalmente por áreas de prática da pecuária bovina de pastoreio, onde a vegetação secundária dá lugar a ocorrência de solo exposto, sendo evidente na região centro-sul da BHRPind (Figura 27).

> É a área destinada ao pastoreio do gado, formada mediante plantio de forragens perenes ou aproveitamento e melhoria de pastagens naturais. Nestas áreas, o solo está coberto por vegetação de gramíneas e/ou leguminosas, cuja altura pode variar de alguns decímetros a alguns metros. A atividade que se desenvolve sobre essas pastagens é a pecuária em que se procura unir ciência e tecnologia visando à produção de animais domésticos com objetivos econômicos, tais como a criação e o tratamento de animais de grande porte, criação de animais de médio porte e animais de pequeno porte (IBGE, 2013, p. 79).

Os municípios de Bom Jesus das Selvas, Buritirana, Arame e Bom Jardim representam grande presença de tal tipo de uso (Figura 24). Os referidos municípios apresentam relevo variando entre ondulado e suavemente ondulado, dificultando o uso dessas áreas para o plantio de monoculturas, necessitando de maquinário específico e, principalmente, um processo de regulação topográfica do terreno.

**Figura 24** – Mosaico de vegetação (pastagem) no município de Bom Jesus das Selvas

Fonte: Arquivo pessoal (2021).

A pastagem, além de sua utilização para o meio pecuário, abrange grandes extensões da área da bacia por conta do avanço da malha urbana. A construção de moradias em áreas com predominância rural na BHRPind, consequentemente, modificará os parâmetros geoambientais

da fauna e flora presentes, principalmente alterações da vegetação nativa para diversas outras utilizações, sendo uma delas a pastagem. As áreas urbanizadas na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, no ano de 2021, corresponderam ao maior percentual de todas as faixas temporais analisadas, sendo um total de 0,17% (Tabela 28), abrangendo 68,95 km$^2$ (Figura 25).

**Figura 25** – Área urbanizada com redondezas de pastagem e vegetação natural no município de Alto Alegre do Pindaré - MA

Fonte: Arquivo pessoal (2021).

Esse alto percentual na classe pastagem, juntamente com as áreas urbanizadas, representa, no ano de 2021, uma baixa na área com predominância de vegetações nativas. Tal afirmação é ratificada pela diferença na abrangência das formações florestais entre os anos de 1991 e 2021. Em 1991, as vegetações naturais correspondiam a 28.347,405 km$^2$, enquanto em 2021, as formações florestais corresponderam a um total de 18.264,645 km$^2$; ou seja, uma diminuição de mais de 10.000 km$^2$, no total da extensão em 30 anos.

Observa-se ainda que a presença de terras indígenas (Figura 26) na região delimita as áreas onde as formações florestais não deram lugar à pastagem. Os municípios de Amarante do Maranhão, Bom Jardim, Bom Jesus das Selvas, Buriticupu, São João do Caru e Centro Novo do Maranhão representam essa delimitação. Poucos municípios fora dos limites das terras indígenas e da reserva biológica ainda apresentam grandes extensões das formações florestais, sendo um deles Santa Luzia.

**Figura 26** – Áreas de formações florestais em terras indígenas na região do Rio Caru

Fonte: Arquivo pessoal (2021).

Com o aumento nas áreas com predominância da pastagem (Tabela 29), tem-se uma maior incidência de áreas descobertas. Nas áreas de pastagem, diferentemente das áreas utilizadas para agricultura, não há preocupação com a fertilidade do solo, o que resulta na inexistência do sorgo (vegetação de proteção) ou demais vegetações rasteiras, que coíbem o acesso direto da radiação solar à superfície.

Assim, quanto maior a extensão de pastagem e solos expostos em detrimento das formações florestais, maior será a propensão do mesmo ambiente se apresentar em estado de vulnerabilidade ambiental.

**Tabela 28** – Classes de uso e cobertura da terra na BHRPind em 2021

| **Classe** | **Área (km$^2$)** | **Área em %** |
|---|---|---|
| Apicum | 0,01 | 0,00% |
| Mineração | 4,262 | 0,01% |
| Mangue | 4,922 | 0,01% |
| Área Urbanizada | 68,95 | 0,17% |
| Outras Áreas não vegetadas | 88,469 | 0,22% |
| Mosaico de Usos | 93,708 | 0,23% |
| Formação Campestre | 171,612 | 0,42% |
| Outras Lavouras Temporárias | 178,533 | 0,44% |
| Formação Savânica | 257,631 | 0,64% |
| Silvicultura | 276,889 | 0,69% |
| Rio, Lago e Oceano | 449,073 | 1,11% |
| Campo Alagado e Área Pantanosa | 494,296 | 1,22% |
| Soja | 755,682 | 1,87% |
| Formação Florestal | 18.264,645 | 45,21% |
| Pastagem | 19.293,28 | 47,75% |
| Total | 40.401,96 | 100% |

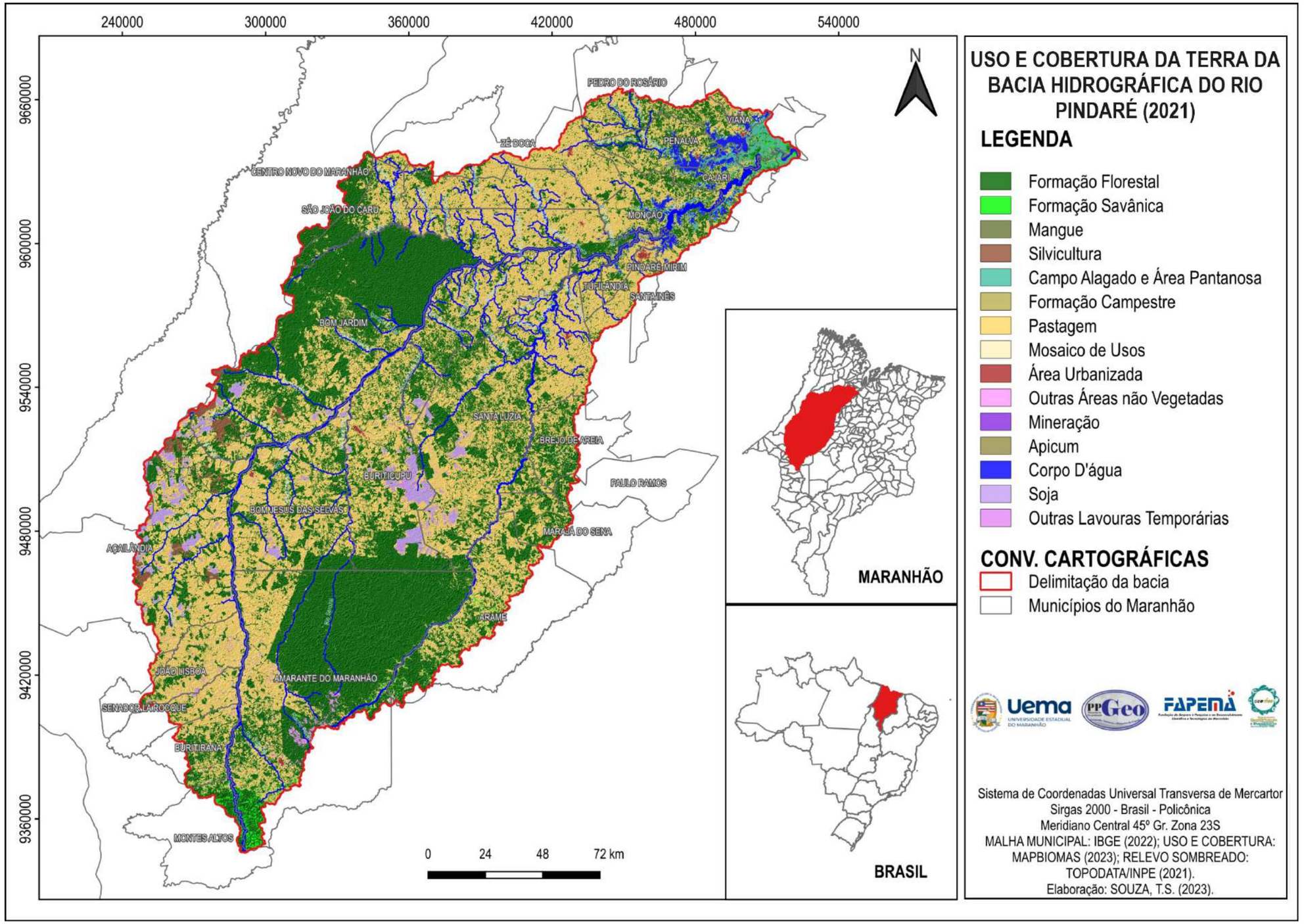
Fonte: Mapbiomas (2023). Organizada pelo pesquisador (2023).

**Tabela 29** – Evolução do uso e cobertura da terra entre os anos de 1991 a 2021 na BHRPind

| 1991 | | 2001 | | 2011 | | 2021 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Classes** | Área (%) | Classes | Área (%) | Classe | Área em % | Classe | Área em % |
| **Outras Lavouras Temporárias** | 0,00% | Apicum | 0,00% | Apicum | 0,00% | Apicum | 0,00% |
| **Apicum** | 0,00% | Soja | 0,00% | Soja | 0,00% | Mineração | 0,01% |
| **Silvicultura** | 0,00% | Mineração | 0,00% | Mineração | 0,01% | Mangue | 0,01% |
| **Mineração** | 0,00% | Outras Lavouras Temporárias | 0,01% | Mangue | 0,02% | Área Urbanizada | 0,17% |
| **Mangue** | 0,01% | Mangue | 0,02% | Outras Lavouras Temporárias | 0,07% | Outras Áreas não vegetadas | 0,22% |
| **Área Urbanizada** | 0,06% | Silvicultura | 0,08% | Mosaico de Usos | 0,09% | Mosaico de Usos | 0,23% |
| **Outras Áreas não vegetadas** | 0,23% | Área Urbanizada | 0,10% | Área Urbanizada | 0,13% | Formação Campestre | 0,42% |
| **Mosaico de Usos** | 0,30% | Mosaico de Usos | 0,20% | Outras Áreas não vegetadas | 0,21% | Outras Lavouras Temporárias | 0,44% |
| **Formação Campestre** | 0,68% | Outras Áreas não vegetadas | 0,21% | Formação Campestre | 0,42% | Formação Savânica | 0,64% |
| **Rio, Lago e Oceano** | 0,84% | Formação Campestre | 0,40% | Silvicultura | 0,48% | Silvicultura | 0,69% |
| **Formação Savânica** | 1,03% | Rio, Lago e Oceano | 1,29% | Formação Savânica | 0,70% | Rio, Lago e Oceano | 1,11% |
| **Campo Alagado e Área Pantanosa** | 1,24% | Formação Savânica | 0,71% | Campo Alagado e Área Pantanosa | 1,00% | Campo Alagado e Área Pantanosa | 1,22% |
| **Pastagem** | 25,43% | Campo Alagado e Área Pantanosa | 0,96% | Rio, Lago e Oceano | 1,24% | Soja | 1,87% |
| **Formação Florestal** | 70,16% | Pastagem | 37,55% | Formação Florestal | 46,29% | Formação Florestal | 45,21% |
| **Total** | 100,00% | Formação Florestal | 58,47% | Pastagem | 49,34% | Pastagem | 47,75% |
| | | Total | 100% | Total | 100% | Total | 100% |

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2023).

**Figura 27** – Mapa de uso e cobertura da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA (2021)




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2023).

## 4.13 Vulnerabilidade do uso e cobertura da terra (1991, 2001 e 2011)

O fator uso e cobertura da terra é um dos elementos de maior importância na análise da vulnerabilidade das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré. Notoriamente, ambientes com influência direta de componentes de cunho antrópico representam disposições que, quando inseridas em prejuízo da cobertura vegetal, levam a processos de degradação ambiental, seja a biodiversidade ou a geodiversidade. Nesse contexto, entende-se que tais processos, em larga escala na BHRPind, representam cenários de instabilidade ou incapacidade do ambiente de se recompor após determinadas ações, sendo o evento impactante e iminente.

Assim, no intervalo proposto na análise da vulnerabilidade ao uso e cobertura da terra, identificou-se que, no ano de 1991, houve predominância da classificação 'moderadamente estável', abrangendo 28.848,638 km$^2$ (Tabela 30), enquanto que a segunda classe de maior proporção corresponde a 'vulnerável', com 10.515,349 km$^2$. Tal ocorrência de estabilidade se dá devido a forte presença das Formações Florestais e áreas alagadas e pantanosas no referido ano, onde se tinha mais da metade da área de estudo moderadamente estabilizada, ou seja, pouco mais de 71%, sendo evidente nos municípios de Alto Alegre do Pindaré, Bom Jardim, Buriticupu e Amarante do Maranhão.

Quanto à vulnerabilidade, no ano de 1991, esta se apresentou principalmente em virtude da ocorrência de pastagem, propensa à erosividade em razão da inexistência de cobertura vegetal densa. A supracitada classificação é observada principalmente na parte centro-norte da bacia, entre os municípios de Zé Doca e Tufilândia, abrangendo 10515,349 km$^2$ em 1991.

**Tabela 30** – Vulnerabilidade do uso e cobertura da terra na BHRPind entre 1991 e 2011

| | **1991** | **% 1991** | **2001** | **% 2001** | **2011** | **% 2011** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Estável** | 339,269 | 0,84% | 521,318 | 1,29% | 500,284 | 1,24% |
| **Moderadamente Estável** | 28.848,638 | 71,40% | 24.011,946 | 59,43% | 19.106,384 | 47,29% |
| **Medianamente Estável/Vulnerável** | 422,229 | 1,05% | 294,232 | 0,73% | 289,864 | 0,72% |
| **Moderadamente Vulnerável** | 276,475 | 0,68% | 161,339 | 0,40% | 169,04 | 0,42% |
| **Vulnerável** | 10.515,349 | 26,03% | 15.413,125 | 38,15% | 20.336,388 | 50,34% |
| **Total** | 40.401,96 | 100% | 40.401,96 | 100% | 40.401,96 | 100% |

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2024).

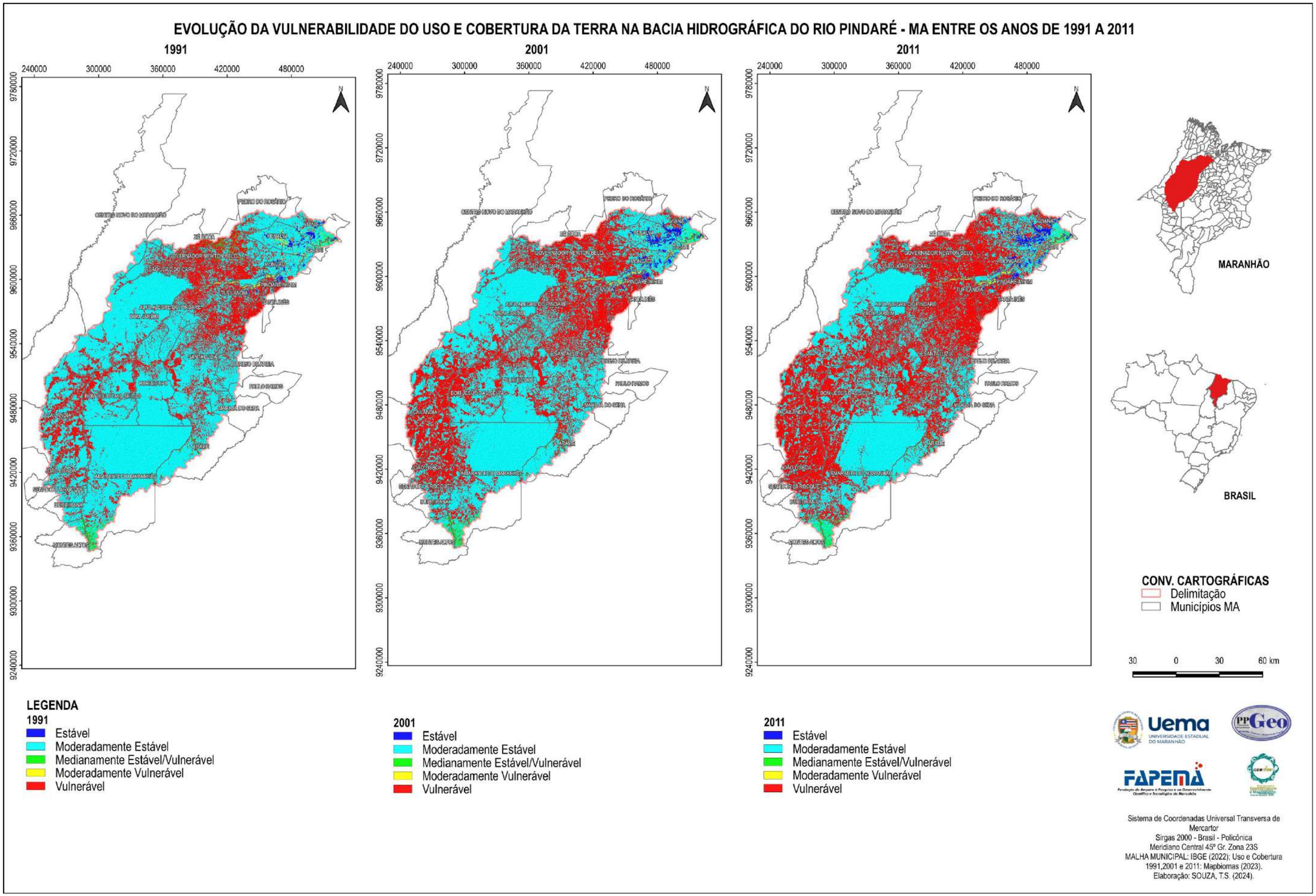
No ano de 2001, identificou-se um aumento considerável da classificação 'vulnerável' nas unidades de paisagem, em comparação com a década anterior, de aproximadamente 4897 km$^2$. Apesar da menor classe de estabilidade subir de 0,84% para 1,29% do total da área da bacia, observa-se que a moderável estabilidade, de maior ocorrência em 1991, regrediu,

abrangendo em 2001 um total de 24011,946 km$^2$. Esse aumento da vulnerabilidade em 2001 foi mais evidente nos municípios de Açailândia, João Lisboa e Senador Larocque, além do trecho central entre as cidades de Alto Alegre do Pindaré e Buriticupu.

O ano de 2011 marca uma mudança de cenários ambientais da bacia hidrográfica do Rio Pindaré. O que antes era um balanceamento ainda favorável à estabilidade das unidades de paisagem, agora passa a ser denominado pela classe ‘vulnerável’ nos parâmetros de uso e cobertura da terra, com 50,34% da área da bacia, considerada de maior abrangência.

O referido ano apresenta o viés direto de detrimento da moderável estabilidade, em favorecimento à vulnerabilidade, tendo as demais classificações poucas modificações em relação à década anterior. Os municípios de Amarante do Maranhão, Bom Jesus das Selvas, Buriticupu e Santa Luzia correspondem aos principais ambientes modificados, sendo as terras indígenas e a Reserva Biológica do Gurupi os limites das áreas moderadamente estáveis remanescentes, ou seja, com vegetação natural ainda predominante.

**Figura 28** – Evolução da vulnerabilidade do uso e cobertura da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA entre os anos de 1991 e 2011




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2024).

## 4.14 Vulnerabilidade do uso e cobertura da terra (2021)

No ano de 2021, camada mais atual do uso e cobertura da terra da presente pesquisa, identifica-se múltiplos avanços que representaram riscos e vulnerabilidades das unidades de paisagem para tal fator (Tabela 31), propiciando a intensificação de processos erosivos e, principalmente, o desenvolvimento de novos cenários para os ambientes em questão.

**Tabela 31** – Vulnerabilidade do uso e cobertura da terra na BHRPind em 2021

| | **2021** | **% 2021** |
|---|---|---|
| **Estável** | 449,073 | 1,11% |
| **Moderadamente Estável** | 18.758,941 | 46,43% |
| **Medianamente Estável/Vulnerável** | 262,554 | 0,65% |
| **Moderadamente Vulnerável** | 171,612 | 0,42% |
| **Vulnerável** | 20.759,78 | 51,38% |
| **Total** | 40.401,96 | 100% |

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2024).

Nas classes de uso em que o estado ‘vulnerável’ foi atribuído, observa-se, na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, uma intensa relação com a perda de matéria vegetal, inteiramente relacionada a fatores antrópicos. Correspondendo a mais da metade da área da bacia, 20.759,78 km$^2$, essas unidades de paisagem vulneráveis correspondem a ambientes com processos múltiplos ligados à pecuária, com a presença de formações de pastagem e empobrecimento do solo devido ao pisoteio do gado; à soja e ao eucalipto, com a inserção de monoculturas e a perda de elementos da biodiversidade como a fauna e flora; e outras diversas atividades ligadas ao extrativismo, seja ele vegetal ou mineral.

> A atividade madeireira nessa região representou uma importante atividade econômica e contribuiu com o crescimento demográfico e econômico de várias cidades onde polos madeireiros se desenvolveram (Açailândia, Imperatriz, Itinga do Maranhão e Buriticupu no Maranhão e Paragominas e Ulianópolis no Pará) (Celentano, 2018, p. 319).

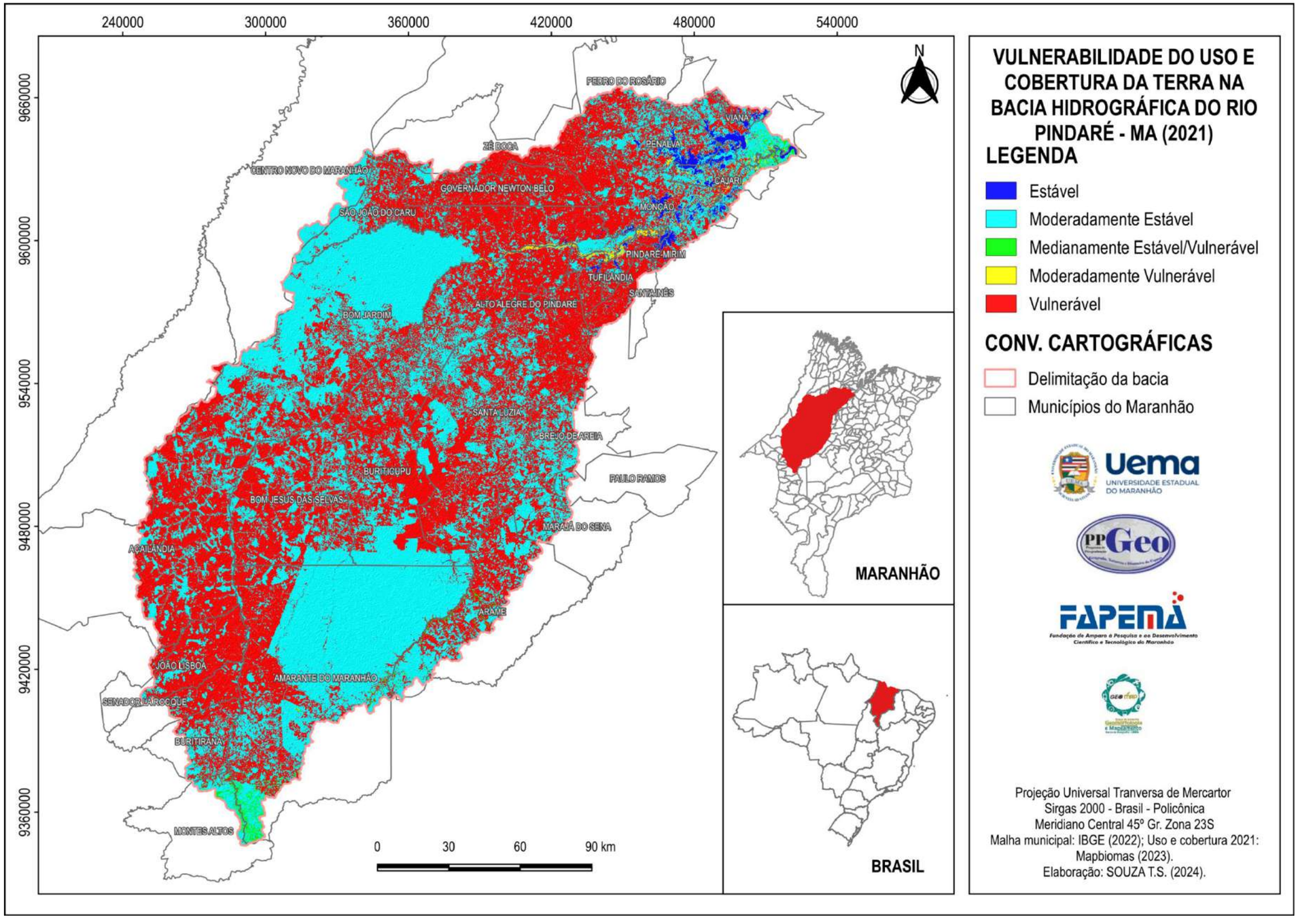
Sendo um dos principais ramos no contexto econômico do Estado do Maranhão, a extração madeireira é uma atividade inteiramente ligada ao processo de supressão da vegetação. Apesar das chamadas “florestas plantadas” serem apontadas como o meio pelo qual tal atividade se sustenta, principalmente pelo eucalípito, a extração ilegal de madeira ainda é um problema percistente na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, que somado às práticas agrícolas irregulares, tem trazido prejuízos cada vez maiores para a área em questão. Esse processo é melhor observado no ano de 2021, com as áreas consideradas vulneráveis correspondendo a

grande parte do centro-sul da bacia, em linha reta, entre os municípios de Zé Doca e Santa Luzia, além das cidades de Açailândia, Bom Jesus das Selvas, Buriticupu e João Lisboa.

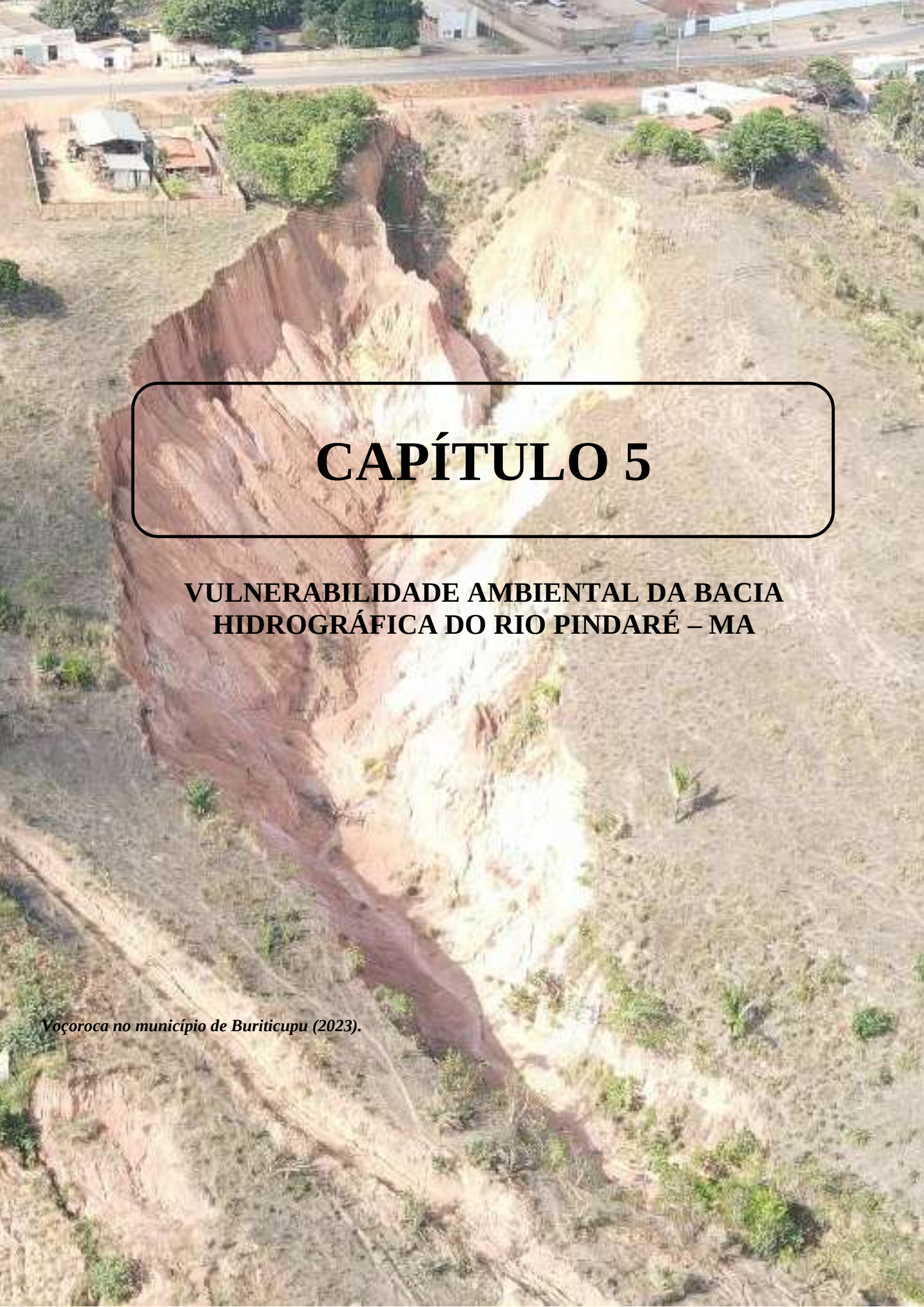
Apesar dessa intensa vulnerabilidade identificada nas unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré no ano de 2021, observa-se que há persistências de graus de estabilidades em áreas remanescentes, incorporando a possibilidade de processos e reversão dos diagnósticos de vulnerabilidade.

As unidades de paisagem consideradas ‘moderadamente estáveis’, ou seja, a segunda maior classificação identificada no ano de 2021 na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, abrangeram principalmente as terras indígenas e a Reserva Biológica do Gurupi, nos municípios de Amarante do Maranhão, São João do Caru e Bom Jardim. Com um total de 18.758,941 $km^2$, cerca de 46% da área.

**Figura 29** – Vulnerabilidade do uso e cobertura da terra das Unidades de Paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré (2021)




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2022)



# CAPÍTULO 5

## VULNERABILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PINDARÉ – MA

*Voçoroca no município de Buriticupu (2023).*

## 5.1 Vulnerabilidade ambiental das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré – MA (1991 a 2011)

A partir da operacionalização do grau de estabilidade/vulnerabilidade realizado em meio computacional, obteve-se, referente à vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré entre os anos 1991 e 2011 (Figura 31), os seguintes resultados.

Quanto às unidades de paisagem classificadas como ‘estáveis’, nas quais predomina os processos de pedogênese, os anos de 2001 e 2011 apresentaram os maiores índices, 1,08% e 1,05%, respectivamente (Tabela 32). Tais unidades encontram-se localizadas principalmente nos cursos d’água referente à foz da bacia, especificamente nos municípios de Viana, Penalva, Monção e Cajari (Figura 30). As características que contribuem para que essas áreas sejam denominadas como ‘estáveis’ refletem ao fato de que correspondem a massas de água, campos alagados e áreas pantanosas, apresentando também uma baixa energia potencial erosiva, além da menor intensidade pluviométrica de todo o limite da bacia hidrográfica do Rio Pindaré.

**Figura 30** – Corpo d’água no município de Cajari/MA

Fonte: Arquivo pessoal (2023).

As unidades de paisagem ‘moderadamente estáveis’ se apresentaram também com maior intensidade nos anos de 2001 e 2011. O ano de 2001 apresentou um total de 36,61% de sua área classificada como ‘moderadamente estável’, abrangendo um total de 14.791,156 km$^2$,

enquanto que no ano de 2011 esse percentual transcende apenas 5,68%, correspondendo a 30,93% da área total da BHRPind, ou seja, 12496,042 km$^2$.

A supracitada classificação se especializa principalmente entre os municípios de Amarante do Maranhão, Bom Jesus das Selvas, João Lisboa, Senador La Rocque e Açailândia, além de porções dos municípios de Buriticupu, Bom Jardim, Santa Luzia e Buritirana. O principal fator determinante para a classificação das áreas como ‘moderadamente estáveis’ percorre os componentes de intensidade pluviométrica dos anos de 2001 e 2011, nos quais se apresentaram os menores índices dos anos analisados, tendo o ano de 2011 o menor intervalo de intensidade de chuvas, sendo o menor 366,89 mm e a maior de 371,01 mm.

Observa-se também a variação entre ‘moderadamente estável’ e ‘medianamente estável/vulnerável’ para o fator energia potencial erosiva na referida área, representando, assim, uma baixa e média declividade, dissecação vertical e dissecação horizontal na classe ‘moderadamente estável’ da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré. Além disso, a presença de remanescentes de vegetação principalmente na Terra Indígena Araribóia, assim como a ocorrência de múltiplas classes de latossolos – solos altamente desenvolvidos, profundos e com alta permeabilidade –, influenciam diretamente na moderável estabilidade. A respeito da classe dos Latossolos, Fushimi (2012, p. 69) expõe que:

> São, em geral, solos com boas propriedades físicas em avançado estágio de intemperização, cujos perfis são espessos (com mais de três metros de profundidade) e os horizontes bem formados. Em virtude do intenso intemperismo a que são submetidos, geralmente são pobres em nutrientes vegetais.

Nas unidades de paisagem ‘medianamente estáveis/vulneráveis’, tem-se o início dos meios intergrades, nos quais há equilíbrio entre pedogênese e morfogênese. Em tal classificação, identificou-se 1991 como o ano de maior intensidade, abrangendo 23.509,13 km$^2$ do total da área da bacia, cerca de 58,19%, com ocorrência quase predominante em Amarante do Maranhão, Bom Jesus das Selvas, Buriticupu e Arame, na região centro-sul da BHRPind.

A intensidade pluviométrica de 1991 representa o maior índice de chuva no intervalo de trinta anos, variando de 334,43 a 848,01 mm, sendo seu menor valor apenas 36,58 mm mais baixo que o maior valor registrado em 2011, e mais que o dobro da máxima registrada em 2011. Tal intensidade, aliada à dissecação do relevo e declividade variando entre ‘forte’ e ‘muito forte’, proporciona um grande potencial a processos erosivos resultantes do escoamento superficial, principalmente em ambientes com baixa incidência de cobertura vegetal.

Na classificação das unidades de paisagem ‘moderadamente vulneráveis’, identificou-se o ano de 2011 com a maior predominância, estando associada ao processo de supressão da

vegetação natural e o grau de denudação das rochas. Observa-se que, no intervalo dos anos de 1991 a 2011, houve um aumento significativo da referida classificação entre os municípios de Zé Doca, Governador Newton Bello, Tufilândia e Santa Luzia, indo de 9.517,874 km$^2$ em 1991 para 12.386,993 km$^2$ em 2011, correspondendo a um aumento de 7,1% em trinta anos.

Observa-se que a presença da Formação Itapecuru influencia diretamente na moderável vulnerabilidade da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, estando associada a rochas como Arenito, Arenito arcoseano, Argilito, Folhelhos e Siltitos, suscetíveis à denudação e processos erosivos, classificadas de ‘moderadamente vulneráveis’ a ‘vulneráveis’.

Na classificação ‘vulnerável’ das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, identificou-se uma predominância na porção norte-nordeste da área de estudo. O ano de 2011 (isento 2021), corresponde ao maior percentual da classificação, totalizando 10,78% nos municípios de Viana, Pedro do Rosário, Zé Doca, Penalva, Monção, Pindaré Mirim, Cajari, Tufilândia, São João do Caru, Governador Newton Bello, Santa Inês e Santa Luzia.

Os parâmetros ‘geologia’, ‘solos’ e ‘uso e cobertura da terra’ são fatores determinantes dessa classificação nesses municípios, em vista da iminente presença de elementos favoráveis à morfogênese. Nas unidades de paisagem vulneráveis, a geologia percorre classificações de ‘moderadamente vulneráveis’ e ‘vulneráveis’, com as unidades litoestratigráficas Depósitos Aluvinares, Depósitos Flúvio-Lagunares e Depósitos de Pântanos e Mangues, caracterizadas como rochas de sedimentos inconsolidados, instáveis e propensas à erosão.

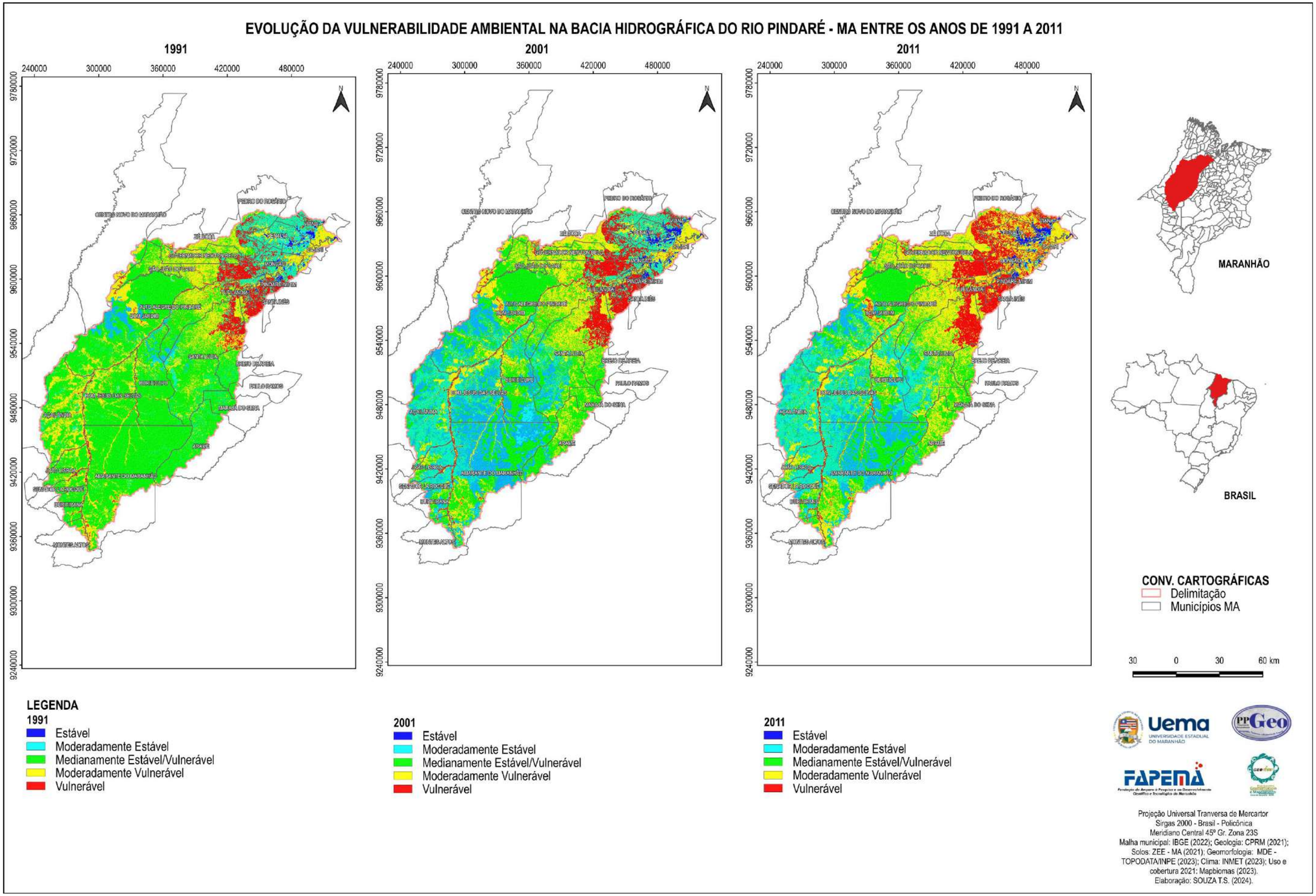
No fator solo, múltiplas variações de plintossolos, gleissolos e neossolos, com baixa capacidade de drenagem e pouco desenvolvimento, corroboram para a classificação como vulneráveis. Além disso, o avanço da pastagem perante às formações florestais naturais, impulsionam cada vez mais o processo de morfogênese associada à perda de cobertura do solo e do sistema radicular, intensificando múltiplas dissecações.

**Tabela 32** – Vulnerabilidade ambiental da BHRPind (1991-2011)

| LEGENDA | 1991 km$^2$ | 1991 % | 2001 km$^2$ | 2001 % | 2011 km$^2$ | 2011 % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Estável** | 268,303 | 0,66% | 434,445 | 1,08% | 423,276 | 1,05% |
| **Moderadamente Estável** | 4495,447 | 11,13% | 14791,156 | 36,61% | 12496,042 | 30,93% |
| **Medianamente Estável/Vulnerável** | 23509,13 | 58,19% | 12519,008 | 30,99% | 10739,638 | 26,58% |
| **Moderadamente Vulnerável** | 9517,874 | 23,56% | 9180,095 | 22,72% | 12386,993 | 30,66% |
| **Vulnerável** | 2611,202 | 6,46% | 3477,256 | 8,61% | 4356,011 | 10,78% |
| **TOTAL** | 40401,96 | 100,00% | 40401,96 | 100,00% | 40401,96 | 100,00% |

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2024).

**Figura 31** – Evolução da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA entre os anos de 1991 e 2011




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2024).

## 5.2 Vulnerabilidade ambiental das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA (2021)

O ano de 2021 remonta os componentes mais atuais da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré nesta pesquisa (Figura 36), onde o estado de suas unidades de paisagem pôde ser observado *in loco*.

A estabilidade das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré correspondeu ao menor percentual de área desde 1991, abrangendo um total de 0,94% da bacia (Tabela 33). Essa estabilidade é consequência das áreas com a ocorrência de ambientes aquáticos, sejam eles rios, lagos e áreas pantanosas, predominantes principalmente ao sul da bacia, entre os municípios de Viana, Penalva, Monção, Cajari e Pindaré-Mirim. Tal classificação se dá em decorrência de massas d'água continentais, além da proximidade com a foz da bacia, onde, no trecho de confluência com o deságue no Rio Mearim, o Rio Pindaré encontra-se com maior intensidade de fluxo (Figura 32).

**Figura 32** – Trecho do Rio Pindaré nas proximidades do município de Pindaré-Mirim

Fonte: Arquivo pessoal (2021).

Nos mesmos municípios de Viana, Penalva, Monção, Cajari e Pindaré-Mirim, além de Pedro do Rosário, Governador Newton Bello, Tufilândia, Santa Inês, Zé Doca, Santa Luzia e Alto Alegre do Pindaré, encontra-se a classificação 'vulnerável' das unidades de paisagem da BHRPind no ano de 2021. No total, as unidades de paisagem classificadas como 'vulneráveis' abrangeram 4.387,817 km$^2$, correspondendo a 10,86% do total da área da bacia hidrográfica do

Rio Pindaré. A pecuária, como uma das práticas ocorrentes na área, impulsiona diretamente no processo de supressão da vegetação nativa, onde a pastagem toma o lugar das múltiplas formações florestais naturais.

Nessas regiões, essas coberturas vegetais intensas, propensas à estabilidade das unidades de paisagem, são identificadas em baixa proporção e tendo a vegetação rasteira, com a presença de arbustos de pequeno porte e babaçuais, além de múltiplas áreas de solo exposto, predominância na referida área da bacia (Figura 33).

**Figura 33** – Áreas com a presença de pastagem de solo exposto no Rio Zutiua, principal afluente do Rio Pindaré, município de Alto Alegre do Pindaré

Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Componentes ambientais caracterizados como em estado de vulnerabilidade nas unidades da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, além do uso e cobertura, remetem principalmente ao solo, à geologia e às atividades de cunho antrópico. O solo na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, assim como nos outros intervalos analisados, apresenta características propensas à erosão, especialmente quando somado à intensidade de escoamento. A erosividade, um elemento essencial no processo de determinação da vulnerabilidade ambiental, é obtida a partir do grau de supressão da vegetação. Áreas urbanas, de extração mineral e solos expostos, são propensas a essas ocorrências.

No município de Buriticupu identificou-se o processo de erosividade em ação, com a formação de voçorocas nas proximidades da cidade (Figura 34), de grande repercussão (Anexo B). Este processo foi principalmente resultado da fraca densidade de cobertura vegetal, da forte

declividade e da intensidade de dissecação, além da ocorrência em área urbanizada, onde, apesar da estabilidade do escoamento superficial inerente à pavimentação, há a ausência de infiltração e do sistema radicular oriundos das formações vegetais, com inclinação a status de vulnerabilidade e efetiva ocorrência do evento.

**Figura 34 –** Voçoroca nas proximidades do município de Buriticupu

Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Na classificação das unidades de paisagem consideradas moderadamente vulneráveis, tem-se uma extensão de 13.959,292 km$^2$, com 34,55% da área total da bacia hidrográfica do Rio Pindaré. Tais unidades, no ano de 2021, predominam na faixa entre os municípios de Zé Doca, Governador Newton Bello, Alto Alegre do Pindaré, São João do Caru, além da forte presença entre os municípios de Montes Altos e Amarante do Maranhão, ao sul da bacia. Tal classificação é identificada na Reserva Biológica do Gurupi, entre as Terras indígenas Caru e Awá, no município de São João do Caru, além de representar a vulnerabilidade dos componentes geologia e solos, também evidencia um avanço ocorrente das formações de pastagem na região, gerando potenciais estados de impactação.

Nas áreas com predominância medianamente estáveis/vulneráveis na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, identificou-se 14.120,146 km$^2$, 34,95% do total da área de estudo. Sendo esta a classe com maior percentual no ano de 2021, ela apresenta intensa relação aos processos erosivos e, consequentemente, à falta de cobertura vegetal, devido à potencial energia erosiva causada pela energia cinética nas partes mais baixas do relevo, além da intensidade de drenagem nos interflúvios. Os municípios de abrangência da classe correspondem principalmente à parte

central da bacia, entre Bom Jardim, Santa Luzia, Buriticupu e Bom Jesus das Selvas (Figura 35) e Amarante do Maranhão, com grande ocorrência nas terras indígenas da área de estudo.

**Figura 35** – Áreas descobertas com relevo irregular na divisa entre Bom Jesus das Selvas e Açailândia

Fonte: Arquivo pessoal (2023).

As unidades de paisagem moderadamente estáveis, correspondentes aos processos de pedogênese que ocorrem relativamente fora de ambientes aquáticos, em sua maioria, estão localizadas na região centro-sul da bacia. Essa moderável estabilidade está geralmente relacionada aos componentes geológicos e geomorfológicos da área, onde se pôde identificar a presença de solos desenvolvidos e rochas resistentes aos processos de alteração da paisagem. Os índices de dissecação e a declividade não apresentaram altas indicações, sendo diretamente influenciados pelos elementos climáticos e pelo uso e cobertura da terra.

O crescimento do cultivo de soja, a presença de múltiplos tipos de lavouras temporárias e a silvicultura contribuem para o processo de intensificação das monoculturas, dificultando a reversão de danos causados ao meio natural. Além disso, destaca-se a intensidade pluviométrica de 2021, que caracteriza-se como vulnerável, estando abaixo apenas do ano de 1991.

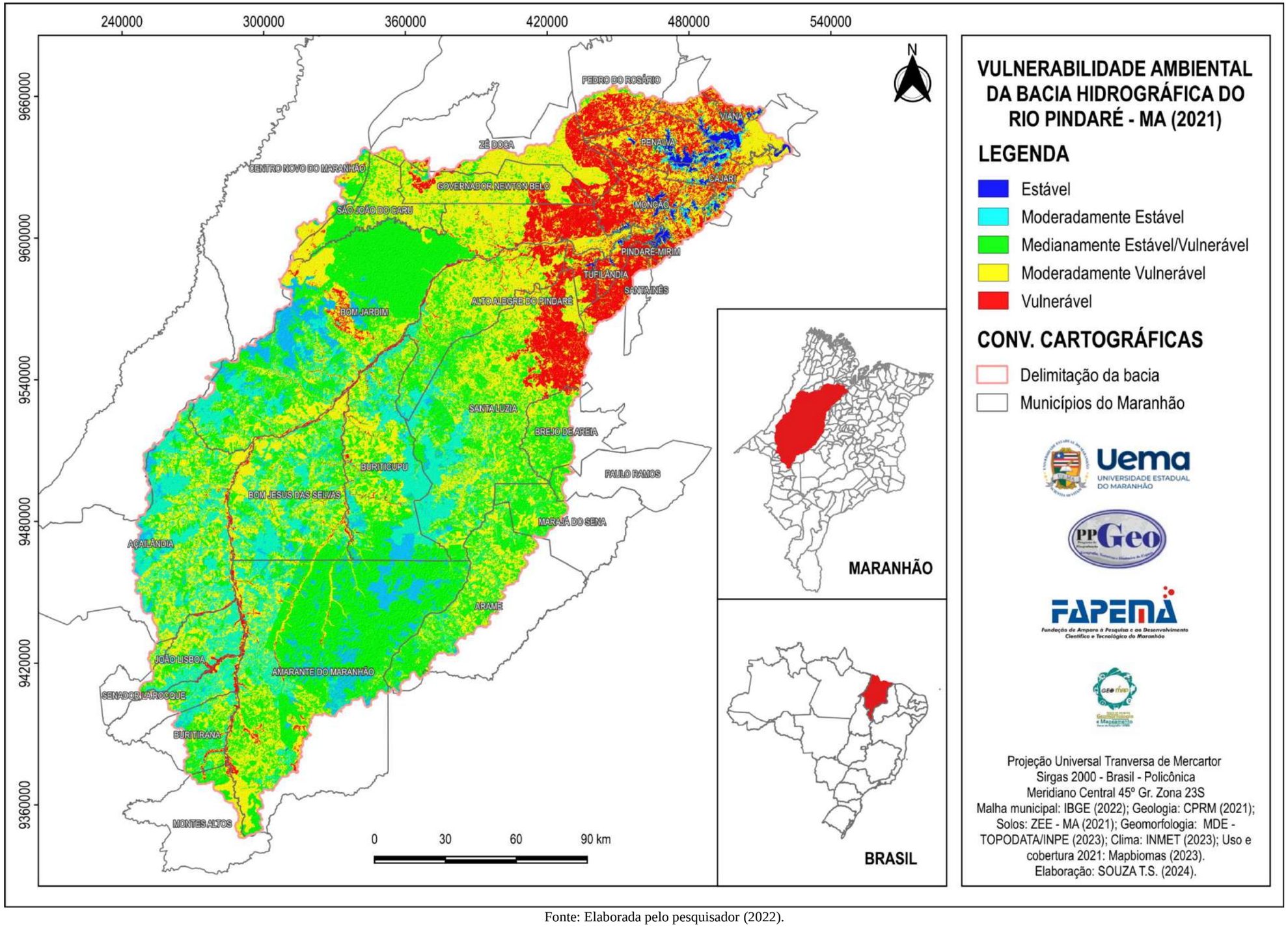
Tal classificação abrange um total de 7.555,988 km$^2$, correspondendo a 18,70% da área da bacia. Inclui os municípios de Bom Jardim, Açailândia, João Lisboa, Buritirana, Senador La Rocque, Buriticupu, Amarante do Maranhão e Santa Luzia.

**Tabela 33** – Vulnerabilidade ambiental da BHRPind 2021

| LEGENDA | 2021<br>km² | 2021<br>% |
|---|---|---|
| **Estável** | 378,717 | 0,94% |
| **Moderadamente Estável** | 7555,988 | 18,70% |
| **Medianamente Estável/Vulnerável** | 14120,146 | 34,95% |
| **Moderadamente Vulnerável** | 13959,292 | 34,55% |
| **Vulnerável** | 4387,817 | 10,86% |
| **TOTAL** | 40401,96 | 100,00% |

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2024).

**Figura 36** – Mapa de vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA (2021)




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2022).

A correlação entre os atributos das unidades de paisagem da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, demonstra a presença de ambientes com intensos processos de modificação, que, em grande escala, têm resultado na difícil reversão de danos. Em geral, a definição de estabilidade ou vulnerabilidade de uma determinada área é feita a partir da análise da capacidade desta de resistir a eventos ocorrentes, sendo necessário que seus elementos físicos e antrópicos estejam em conformidade para suportar potenciais impactos. Essa conformidade, ou aptidão à resistência, se dá em correlação com os elementos analisados na vulnerabilidade ambiental, que, na BHRPind, incluem geologia, solos, geomorfologia, clima e uso e cobertura da terra.

Assim, aplicada a Matriz de Vulnerabilidade Fator x Evento, adaptação da Matriz de Impactos, ou Matriz de Correlação Causa x Efeito, proposta por Leopold (1971 *apud* Mota; Aquino, 2002), observa-se a influência direta e indireta dos fatores de vulnerabilidade das unidades de paisagem em relação aos eventos potenciais, tendo como resultado a Tabela 34.

Com a realização da Matriz, foi possível identificar que o fator geologia das unidades de paisagem, quanto às maiores influências, apresentou as seguintes classificações: Magnitude, classificada como pequena; Importância, classificada como moderada; e a Duração, classificada como média. Essa definição decorre do fato de que, na classe pequena, há uma magnitude inexpressiva da geologia perante à erosão, desertificação e supressão da vegetação nativa; na classe moderada, há uma influência da geologia com dimensões recuperáveis, especialmente quando vulneráveis à dissecação do relevo, erosão e eventos impactantes diretos ao meio antrópico, como empreendimentos e aptidão agrícola; e com ‘média permanência’ da vulnerabilidade, no que diz respeito à duração.

Em relação ao fator solo das unidades de paisagem, quanto às maiores influências, destacam-se: Magnitude, classificada como média e grande; Importância, classificada como moderada; e a Duração, classificada como média. Assim, entende-se que no fator solo há uma magnitude que caminha de média e expressiva, sem causar descaracterização do ambiente, até uma grande magnitude, que leva à descaracterização em função da dissecação do relevo, desertificação e supressão da vegetação nativa. Na importância, com a classificação moderada, o fator solo apresenta uma influência cujas dimensões são recuperáveis, quando vulneráveis no intemperismo, desertificação, supressão da vegetação nativa e nos empreendimentos. Por fim, quanto à duração, o fator solo apresenta permanência média da vulnerabilidade, relacionada à erosão, desertificação, supressão da vegetação nativa e nos empreendimentos.

Nas unidades de paisagem, quanto ao fator geomorfologia, as maiores influências identificadas foram: a Magnitude classificada como média, a Importância como moderada, e a Duração como longa. Nesse fator, a magnitude e a importância se caracterizam como média e

moderada, respectivamente, abrangendo um aspecto de magnitude expressiva – sem descaracterização do ambiente –, e uma influência do fator com dimensões recuperáveis. Essas classificações englobam especificamente os eventos do meio físico e da cobertura vegetal, como a erosão, o intemperismo, a desertificação e a supressão da vegetação nativa. Na duração, para a BHRPind, a classificação é longa, caracterizando um período extenso ou permanente de vulnerabilidade do fator em relação à dissecação do relevo, erosão, intemperismo e aptidão agrícola.

Em relação ao fator clima, que para este estudo é representado pela intensidade pluviométrica, tem-se como maiores influências: a Magnitude, classificada como média; Importância, classificada como moderada; e a Duração, classificada como média. Observou-se que, para a bacia hidrográfica do Rio Pindaré, o fator clima representou uma drástica influência sobre os eventos, abrangendo a maior quantidade da matriz. Tal informação pode ser compreendida pelo fato de que, embora o clima tenha atuação moderada sobre os eventos, é um fator direto nos processos erosivos, sejam eles de cunho antrópico ou não. Na BHRPind, o clima influencia na dissecação do relevo, erosão, intemperismo, desertificação e supressão da vegetação nativa, em relação à importância.

Por último, o fator uso e cobertura da terra, as principais influências identificadas são a Magnitude, classificada como grande; Importância, classificada como significativa; e a Duração, classificada como média. Neste fator, identifica-se que, apesar da média duração, sua influência impulsiona déficits em relação à capacidade de recuperação do ambiente quando em estado de vulnerabilidade, abrangendo múltiplos meios de ocorrência dos eventos.

**Tabela 34** – Matriz de vulnerabilidade Fator x Evento da bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA

| ELEMENTOS DAS UNIDADES DE PAISAGEM | EVENTOS | FATORES DE VULNERABILIDADE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | GEOLOGIA | | | | | | | | | SOLOS | | | | | | | | | GEOMORFOLOGIA | | | | | | | | | CLIMA | | | | | | | | | USO E COBERTURA DA TERRA | | | | | | | | |
| | | MAGN. | | | IMPORT | | | DURAÇ. | | | MAGN. | | | IMPORT | | | DURAÇ. | | | MAGN. | | | IMPORT | | | DURAÇ. | | | MAGN. | | | IMPORT | | | DURAÇ. | | | MAGN. | | | IMPORT | | | DURAÇ. | | |
| | | P | M | G | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | P | M | G | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | P | M | G | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | P | M | G | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | P | M | G | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Meio Físico | Dissecação do relevo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Erosão | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Intemperismo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Desertificação | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cobertura Vegetal | Supressão da vegetação nativa | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Meio Antrópico | Empreendimentos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Aptidão agrícola | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SUB- TOTAL | | 3 | 2 | 2 | 2 | 4 | 1 | 1 | 4 | 2 | 1 | 3 | 3 | 0 | 4 | 3 | 0 | 4 | 3 | 0 | 4 | 3 | 0 | 4 | 3 | 0 | 3 | 4 | 1 | 4 | 2 | 0 | 5 | 2 | 2 | 4 | 1 | 1 | 2 | 4 | 1 | 2 | 4 | 1 | 4 | 2 |

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2024), adaptada de Leopold (1971).

Nesse sentido, foi possível abranger parâmetros informacionais acerca dos possíveis eventos ocorrentes na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, sendo a vulnerabilidade uma probabilidade potencial de risco. A Tabela 35 apresenta parâmetros quanto aos eventos iminentes na BHRPind e suas proporções, com base na matriz de vulnerabilidade fator x evento, tendo uma correlação dos fatores naturais e antrópicos com a magnitude 'importância', e sobre essa perspectiva de cenário.

**Tabela 35** – Parâmetros de potenciais eventos ocorrentes na bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA

| | **MAGN.** | | | **IMPORT** | | | **DURAÇ.** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | P | M | G | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| **Geologia** | 3 | 2 | 2 | 2 | 4 | 1 | 1 | 4 | 2 |
| **Solos** | 1 | 3 | 3 | 0 | 4 | 3 | 0 | 4 | 3 |
| **Geomorfologia** | 0 | 4 | 3 | 0 | 4 | 3 | 0 | 3 | 4 |
| **Clima** | 1 | 4 | 2 | 0 | 5 | 2 | 2 | 4 | 1 |
| **Uso e cobertura da terra** | 1 | 2 | 4 | 1 | 2 | 4 | 1 | 4 | 2 |
| **Total** | 6 | 15 | 14 | 3 | 19 | 13 | 4 | 19 | 12 |

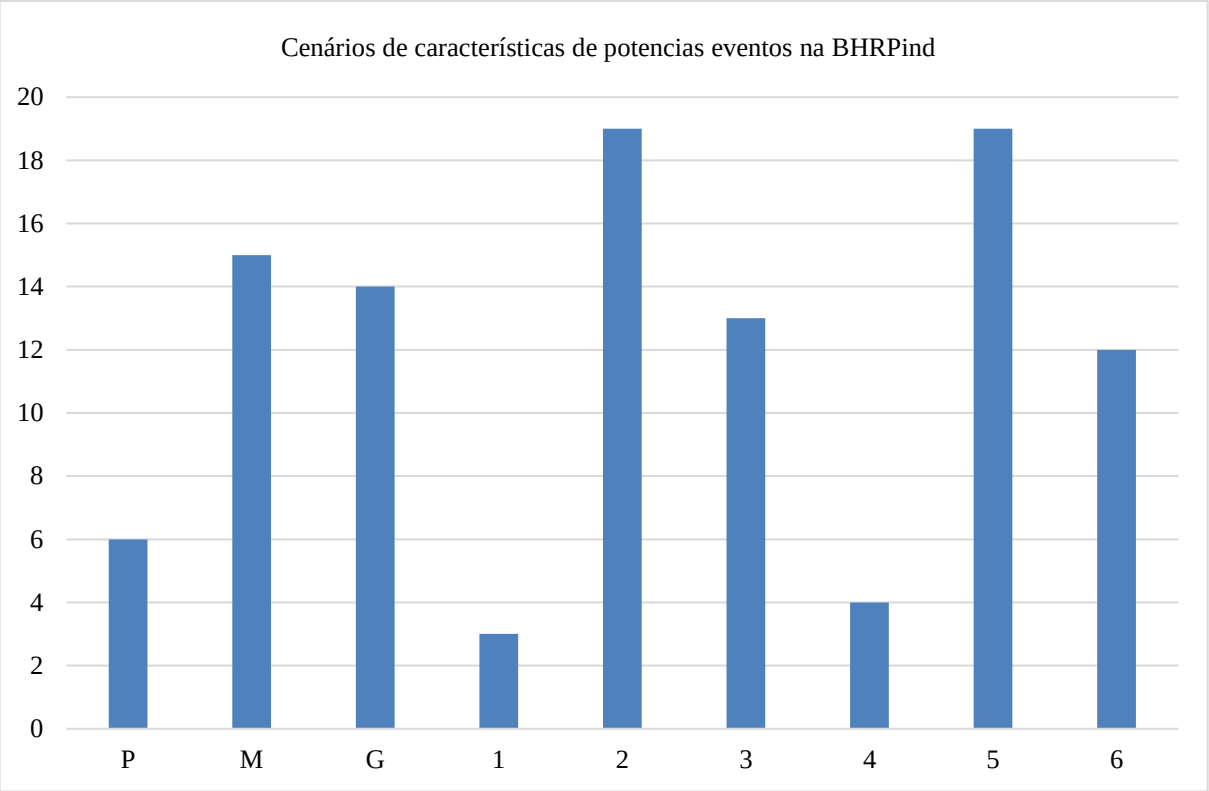
Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2024).

Assim, sob uma perspectiva de possíveis eventos na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, e considerando os níveis de vulnerabilidade estabelecidos na presente pesquisa, ela se apresentará com parâmetros medianos de intensidade dos impactos ao ambiente, em relação à capacidade de reversão. Com isso, entende-se que a geologia, aqui estabelecida como fator de vulnerabilidade, condiciona ambientes instáveis, mas de fácil reversão.

Por outro lado, fatores diretamente relacionados aos processos erosivos das unidades de paisagem, como os solos, a geomorfologia e o uso e cobertura da terra, condicionam um estado impactante do ambiente, com altos níveis de magnitude, importância e duração. Quando correlacionados com os demais elementos, geram uma equiparação dos danos de ocorrência na área analisada.

Nesse contexto, um evento ocorrente na bacia hidrográfica do Rio Pindaré corresponderá a uma magnitude classificada como média, sem a descaracterização da influência no evento. Sua importância será classificada como moderada, com dimensões recuperáveis quando vulnerável ao evento, e a duração será média, indicando média influência na permanência da vulnerabilidade.

**Figura 37** – Cenários de características de potenciais eventos ocorrentes na bacia hidrográfica do Rio Pindaré - MA




Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2024).

A problemática encontrada nas informações apresentadas sobre as vulnerabilidades na presente pesquisa está relacionada a subproblemas de uma questão maior em curso. Com base nas conclusões obtidas acerca da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, importante componente da rede hidrográfica da amazônia maranhense, surgem os seguintes questionamentos: Quais são as áreas potenciais à ocupação humana e com restrições naturais e/ou legais? Como esta bacia pode ser aperfeiçoada em suas atividades de mitigação e aumento de resiliência ambiental?

Assim, surge a perspectiva de um zoneamento ambiental para a bacia hidrográfica do Rio Pindaré, visando constituir uma forma de diagnosticar e apresentar soluções ao uso e capacidade. Com as vulnerabilidades identificadas neste estudo, será possível integrar um plano de mitigação dos impactos e a compartimentalização de áreas, evitando conflitos entre uso e parâmetros de conservação, sejam eles naturais e/ou legais.

Este contexto, alinhado aos diversos avanços de padrões de uso, empobrecimento dos solos, assoreamento, contaminação de recursos hídricos e a redução da biodiversidade na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, fomentam e justificam a indiscutível importância desta pesquisa, alinhada a um possível zoneamento e ao desenvolvimento científico para a gestão de bacias no território maranhense.

## 5.3 Zoneamento ambiental como subsídio ao planejamento ambiental e mitigação de vulnerabilidades

No meio rural da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, o solo exposto ocorre a partir de diferentes tipos de uso agrícola, além das formações de pastagem. Em áreas onde há o predomínio do campesinato, o sorgo (vegetação rasteira) é utilizado como agente inibidor da radiação solar. Sua ausência, atrelada ao pisoteio do gado, às secas recorrentes e, principalmente, à supressão da vegetação, representa os principais causadores de impactos e vulnerabilidades.

Desse modo, entende-se que o uso desenfreado de recursos naturais, formas inadequadas de manejo do solo, entre muitos outros fatores, têm contribuído para o processo de vulnerabilidade ambiental em larga escala na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, principalmente referente ao processo de supressão da vegetação nativa, demonstrando a necessidade iminente de supervisão alinhada às políticas públicas.

> O processo de ocupação do território brasileiro é marcado, historicamente, pela intensa exploração de seus recursos naturais e supressão da vegetação nativa, voltadas para diversas atividades antrópicas, com destaque para a agropecuária e expansão da urbanização. Na região Amazônica, ausência de práticas conservacionistas, voltadas à sustentabilidade ambiental e econômica desencadeou severos problemas e impactos negativos, com destaque a erosão hídrica, perda de qualidade dos solos, redução de oferta hídrica e drástica alteração da cobertura vegetal (Ferreira e Coelho, 2015 *apud* Pereira *et. al.*, 2016, p. 473).

As percepções das vulnerabilidades e degradações, de modo geral, correspondem a um possível processo de mitigação de tais acontecimentos, relacionando-as com fatores de reversão do impacto ambiental negativo. Assim, para a bacia hidrográfica do Rio Pindaré, o fator principal atrelado à vulnerabilidade ambiental remonta à relação entre uso e capacidade. Nesse contexto, é possível observar a utilização desenfreada de áreas e componentes ambientais por parte do meio antrópico, evidenciando a desestabilização destes meios, e consequentemente, a intensificação de processos erosivos.

Os múltiplos usos da terra, considerados como os principais fatores de vulnerabilidade nas unidades de paisagem, permitem compreender a manutenção da dinâmica ambiental, com o entendimento acerca da interação entre o uso e a capacidade, nos quais se tem o meio antrópico como agente modificador. Assim, a capacidade do ambiente de manter a ordem dos componentes ambientais dependerá do manejo adequado das atividades na BHRPind, uma vez que ações contrárias acarretarão em múltiplas alterações, impactos e vulnerabilidades causadas pelas pressões de uso ao meio natural.

O zoneamento ambiental surge como uma forma de organizar tais atividades, de modo a subsidiar um planejamento e ordenamento do uso da terra. Desse modo, é possível zonear áreas de preservação e parâmetros de vegetação existentes; áreas de uso e seus respectivos níveis de restrições; áreas de expansão urbana; e as áreas carentes de recuperação.

O Decreto nº 4.297, de 10 de julho de 2002, que regulamenta o artigo 9, inciso II, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, a respeito do zoneamento ambiental, estabelece, em seu artigo 1, o Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil (ZEE) como instrumento da Política Nacional do Meio Ambiente (Brasil, 2002). O documento "tem por finalidade precípua organizar as decisões dos agentes públicos e privados que envolvam recursos naturais, assegurando a livre movimentação das atividades, mas respeitando o meio ambiente" (Souza, 2013, p. 166).

Segundo Amorim e Oliveira (2013), o zoneamento ambiental é uma ferramenta referente ao uso de recursos, auxiliando na biodiversidade, processos naturais e serviços ecossistêmicos. Este se apresenta como um ponto de equilíbrio entre uso e capacidade, definindo zonas onde os componentes naturais se atrelam de modo racional ao uso atuante, sendo um importante instrumento na tomada de decisões para mitigação de impactos ambientais (Abrão, 2021).

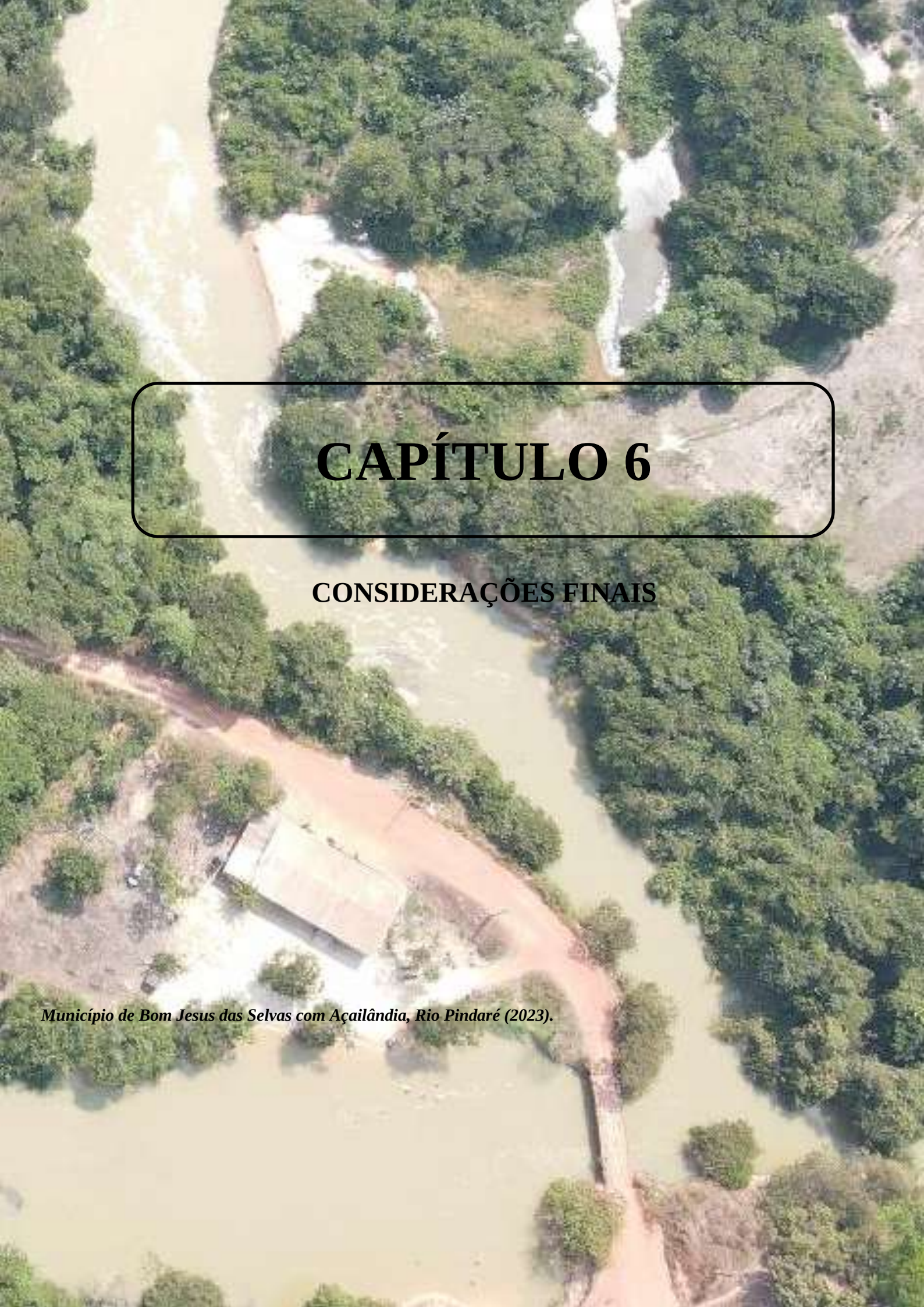
Para Medeiros (2020), o zoneamento ambiental corresponde ao entendimento dos componentes da paisagem perante o planejamento, considerando as fragilidades, potencialidades e a capacidade do uso. Assim, a aplicação de um zoneamento ambiental compõe a perspectiva de diagnosticar a capacidade dos elementos naturais da paisagem perante os processos antrópicos, identificando principalmente o grau de resistência desses elementos a essas ações e os impactos gerados do último sobre o primeiro.

Um zoneamento ambiental para a bacia hidrográfica do Rio Pindaré compreenderá novas perspectivas da dinâmica entre uso, vulnerabilidades e preservação, contribuindo para um planejamento integrado de gestão para a área. Tal análise se mostra importante tendo a bacia hidrográfica como unidade, mesmo pertencendo ao Bioma Amazônico no Estado do Maranhão, que realiza atividades governamentais referentes ao Zoneamento Ecológico-Econômico.

A própria vulnerabilidade aponta a cobertura vegetal como um dos indicadores para os diagnósticos de supressão da vegetação. Atividades de cunho agrícola e pecuário ratificam-se como usos atuantes nesse processo, sendo que até mesmo fatores consequentes de sua presença podem influenciar nessa retirada da vegetação. Exemplo disso incluem as áreas de pastagem, a supressão da mata ciliar dos cursos de água e, principalmente, a retirada da vegetação primária. Assim, com a especificação de zonas de restrições, preservação e uso, é possível alinhar

métodos para ordenar os pontos conflitantes a essas áreas, ou seja, usos que compõem a não conformidade com os componentes ali implementados.

Entretanto, entende-se que a definição de zonas com prognóstico positivo não se refere a buscar soluções alinhadas à contenção radical dos múltiplos tipos de uso, considerando as atividades econômicas associadas ao país. Em vez disso, tal impacto positivo partirá do funcionamento efetivo dos elementos que compõem estas zonas, sejam elas de restrição, com o uso de tal aparato informacional nas decisões de ordenamento; ou ordem legal, com a manutenção dos componentes naturais e conformidades das unidades de conservação.



# CAPÍTULO 6

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

***Município de Bom Jesus das Selvas com Açailândia, Rio Pindaré (2023).***

Em virtude dos parâmetros analisados até o presente momento, tem-se como resultados as seguintes considerações finais:

Quanto aos aspectos litoestratigráficos, identificou-se seis classes abrangentes na área da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, sendo elas: Coberturas Lateríticas Maturas; Depósitos Aluvionares; Depósitos de Pântanos e Mangues, a classe de menor extensão, correspondendo um total de 7,63154 km$^2$, ou seja, 0,02% da área da bacia; Depósitos Flúvio-lagunares; Formação Ipixuna e Formação Itapecuru, sendo esta última a de maior extensão, abrangendo mais de 25.000 km$^2$, correspondendo 62% da BHRPind.

Na análise da vulnerabilidade para o tema geologia, os Depósitos Aluvionares, Depósitos de Pântanos e Mangues e os Depósitos Flúvio-lagunares apresentaram os maiores índices de vulnerabilidade ao fator geológico. Tais unidades localizam-se nas proximidades da foz da bacia e nas margens dos cursos d'água, estando ligadas principalmente à intensificação do processo de intemperismo, em função da energia cinética desenvolvida pelos mananciais da rede de drenagem, onde as mesmas características geológicas se encontram.

No que diz respeito às classes de solos da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, tem-se a ocorrência de múltiplas variações de Argissolos, com o Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico como o de maior abrangência na BHRPind, com 14371,603 km$^2$; Gleissolos; Latossolos; Neossolos; e Plintossolos; além da presença dos Luvissolo Háplico Órtico, sendo este o de menor proporção na área de estudos, apenas 0,04% de sua extensão. Os solos com maior diversidade na área da bacia foram representados pelos Gleissolos, com o Gleissolo Háplico Ta Eutrófico, Gleissolo Háplico Tb Distrófico, Gleissolo Melânico Alítico, Gleissolo Tiomórfico Órtico; e os Plintossolos, com o Plintossolo Argilúvico Distrófico, Plintossolo Argilúvico Eutrófico, Plintossolo Háplico Distrófico, e Plintossolo Pétrico Concrecionário.

Na vulnerabilidade para o fator pedológico chegou-se à conclusão que, as áreas predominantemente vulneráveis na bacia hidrográfica do Rio Pindaré, incidem na presença, em maior extensão, das classes de plintossolos. A proximidade dos plintossolos aos cursos d'água resulta principalmente, considerando o alto teor de retenção de água pelos poros do mesmo, na dificuldade para o uso agrícola.

Na geomorfologia da bacia hidrográfica do Rio Pindaré identificou-se as unidades geomorfológicas Baixada Maranhense; Depressão de Imperatriz; Depressão do Gurupi, a classe de menor extensão na BHRPind, com 14, 622 km$^2$; Planalto Dissecado do Gurupi – Grajaú, sendo esta a unidade de maior extensão na área da bacia, com 26.920,026 km$^2$; Planícies e Terraços Fluviais; Superfície Dissecada de Santa Luzia do Paruá; e Superfície Sublitorânea de Bacabal.

Para a vulnerabilidade ao fator geomorfologia levou-se em consideração o somatório da dissecação do relevo (que representa a junção da dissecação vertical e da dissecação horizontal) com a declividade. Os resultados obtidos de tais parâmetros ambientais são descritos abaixo:

Na dissecação do relevo da BHRPind concluiu-se que, a dissecação classificada como 'Fraca', representou a maior parte da extensão da área da bacia, com mais de 25.000 $km^2$. Apesar da dissecação 'Fraca' representar mais da metade do total da área da bacia, entende-se que a dissecação do relevo na bacia hidrográfica do Rio Pindaré não se encontra estável, em vista que a classe 'Muito Forte', associada à instabilidade ambiental, também apresentar uma grande extensão, com 9894,02 $km^2$.

Quanto à declividade, a bacia hidrográfica do Rio Pindaré apresentou a forma de relevo 'Moderada' (8-20%) como a de maior extensão, representando 13.196,17 $km^2$ da área total da bacia. Já a forma de relevo de menor proporção foi a 'Muito Forte' (45-75%), correspondendo a pouco mais de 1.292 $km^2$.

Assim, no fator geomorfológico de vulnerabilidade, a classe de vulnerabilidade 'Moderadamente Estável' prevaleceu em grande parte da BHRPind, com 89,69% de sua área total. A classe 'Medianamente Estável/Vulnerável' aparece em seguida, com 9,35%, sendo a 'Moderadamente Vulnerável' e a 'Vulnerável' representando menos de 1%.

No que diz respeito ao clima, a partir da intensidade pluviométrica, o ano de 1991 correspondeu a maior intensidade de chuvas em toda a faixa temporal analisada, variando de 334,43 a 848,01 mm. O ano de 2001 compreendeu a maior baixa de intensidade pluviométrica, chegando a 262,98 mm, enquanto que no ano de 2011 tem-se o menor intervalo entre a baixa e a alta intensidade, indo de 366,89 a 370,01 mm. Já em 2021, observou-se uma diferença gradual intensidade pluviométrica. As áreas com baixa, compreendem a parte norte da bacia, em direção à foz; na parte central, localiza-se a área de transição; e a porção sul, corresponde às áreas com alta intensidade. Essa mudança gradual, levando em consideração os elementos da evapotranspiração, pode estar ligada com a evolução do uso e cobertura da terra no respectivo ano. Observa-se que as áreas onde a intensidade é mais alta, compreendem as poucas extensões de formações florestais naturais restantes.

Para a vulnerabilidade do clima chegou-se à conclusão que, no ano de 1991 tem-se o maior nível de vulnerabilidade na BHRPind, presente na parte norte. Já o ano de 2011, correspondeu o de menor vulnerabilidade, considerando que recebeu a classificação de 'Moderadamente Vulnerável' em toda sua extensão.

Em relação ao uso e cobertura da terra, na faixa temporal de 1991 a 2021, observou-se um evidente aumento da pastagem na área da bacia hidrográfica do Rio Pindaré, onde em 1991

tal classe de uso correspondia a 10.274,641 km$^2$, já em 2021 a pastagem ultrapassa a classe anteriormente predominante, com 19.293,28 km$^2$. Outras classes que se destacaram pelo aumento na faixa dos trinta anos foram a silvicultura e a soja. A silvicultura, no ano de 1991, correspondia a 0,086 km$^2$ do total da área da bacia, enquanto que no ano de 2021 passa a abranger 276,889 km$^2$ da extensão da BHRPind. A soja corresponde uma das classes com maior aumento expressivo. Em 1991, tal prática agrícola não era evidente na área da bacia, enquanto que no ano de 2021 a soja passa abranger mais de 755 km$^2$.

Quanto à vulnerabilidade do uso e cobertura da terra, observa-se que as classificações tidas como vulneráveis no ano de 1991 correspondiam a um total de 10.515,349 km$^2$ da área da BHRPind, pouco mais de 26%, enquanto que no ano de 2021, trinta anos depois, esse percentual subiu para mais da metade da área total da bacia, abrangendo 20759,78 km$^2$. Esse aumento se deu principalmente em vista da intensa perda de cobertura vegetal na área, onde as formações florestais naturais deram lugar a formações de pastagem e múltiplos tipos de monoculturas.

Com base nos resultados obtidos nos fatores de vulnerabilidade, conclui-se que a bacia hidrográfica do Rio Pindaré, quanto a sua vulnerabilidade ambiental, apresentou maior estabilidade em ambientes aquáticos, com a predominância de solos bem desenvolvidos. Na última década do século XX, os altos níveis de intensidade pluviométrica contribuíram para a predominância da classificação medianamente estáveis/vulneráveis nas unidades de paisagem, onde há equilíbrio entre pedogênese e morfogênese. Observou-se, em geral, que a BHRPind apresentou múltiplos processos de modificação de suas unidades de paisagem, sendo essas mais estáveis ao sul, intergrade no centro e vulnerável ao norte.

Os diversos tipos de monoculturas têm contribuído para estados de intensa instabilidade dos ambientes, sendo que o plantio, principalmente de soja e eucalipto, intensificam processos como a retirada da vegetação natural, empobrecimento dos solos e a desertificação, impactos cada vez mais ocorrentes na bacia hidrográfica do Rio Pindaré.

Essas atividades, correlacionadas à intensificação das formações de pastagem, vem propiciando estados de difícil reversão quanto aos processos erosivos. Pode-se observar, nos intervalos analisados, uma grande modificação na parte centro-norte da bacia. Essa dinâmica condiciona uma relação direta de entre usos antrópicos vulneráveis e os componentes geoambientais com frágil capacidade de restabelecimento dos padrões originais, tornando as unidades de paisagem com essas características propensas a eventos impactantes negativos.

A bacia hidrográfica do Rio Pindaré é atualmente um habitat de múltiplas dinâmicas ambientais e sociais, tornando-se de grande importância a obtenção de um diagnóstico acerca dos elementos consideráveis vulneráveis. No entanto, vinculado a esse intenso processo de

modificação da paisagem, com o avanço de classes de uso da terra consideradas degradantes ao ambiente, observa-se que ainda é ocorrente a escassez de inventários, análises, diagnósticos e prognósticos da área, que resultam em usos irregulares. Nesse sentido, um zoneamento ambiental que abranja as singularidades da bacia hidrográfica do Rio Pindaré contribuirá para o processo de ocupação com um ordenamento físico-territorial, podendo servir como um norte nas ações de monitoramento dos avanços dos múltiplos tipos de uso e na mitigação de danos aos recursos naturais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, Cleiton Messias Rodrigues. **Zoneamento ambiental da bacia hidrográfica do rio Santo Antônio, Mato Grosso do Sul, Brasil**. 2021. 171 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciências Humanas, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2021.

AMORIM, Raul Reis; OLIVEIRA, Regina Célia de. Zoneamento ambiental, subsídio ao planejamento no uso e ocupação das terras da costa do descobrimento. **Mercator**, Fortaleza, v. 12, n. 29, p. 211-231, set./dez. 2013.

AMORIM, Raul Reis. Um novo olhar na Geografia para os conceitos e aplicações de Geossistemas, Sistemas Antrópicos e Sistemas Ambientais. **Revista Caminhos de Geografia (UFU)**, Uberlândia, v. 13, n. 41, p. 80-101, 2012.

ANAISSE JÚNIOR, José. **Fácies costeiras dos depósitos Itapecuru (Cretáceo), região de Açailândia, bacia do Grajaú**. 1999. 86 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 1999.

AQUINO, Afonso Rodrigues de; PALLETA, Francisco Carlos; ALMEIDA, Josimar Ribeiro de. **Risco ambiental**. São Paulo: Blucher, 2017b.

AQUINO, Afonso Rodrigues de; PALLETA, Francisco Carlos; ALMEIDA, Josimar Ribeiro de. **Vulnerabilidade ambiental**. São Paulo: Blucher, 2017a.

ARAÚJO FILHO, Milton da Costa; MENESES, Paulo Roberto; SANO, Edson Eyji. Sistema de classificação de uso e cobertura da Terra na análise de imagens de satélite**. Revista Brasileira de Cartografia**, n. 59/02, p. 171-179, 2007.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 11ª. Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006.

BARBOSA, Liriane Gonçalves; GONÇALVES, Diogo Laercio. A paisagem em geografia: diferentes escolas e abordagens. **Élisée, Rev. Geo**. UEG, Anápolis, v.3, n.2, p. 92-110, 2014.

BASTOS, Frederico de Holanda; MAIA, Rubson Pinheiro. CORDEIRO, Abner Monteiro Nunes. **Geomorfologia**. Fortaleza: EdUECE, 2015.

BELTRAME, Angela da Veiga. **Diagnóstico do meio físico de bacias hidrográficas:** modelo e aplicação. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1994. *Apud*: COSTA, Grenda Juara Alves; RIBEIRO, Karoline Veloso; ALBUQUERQUE, Emanuel Lindemberg Silva. Aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) na avaliação da cobertura vegetal do município de Regeneração, Estado do Piauí, Brasil. **Revista Geonordeste**, São Cristóvão, ano XXXI, n. 2, p. 230-246, 2020.

BERNARDI, Ewerthon Cezar Schiavo; PANZIERA, André Gonçalves; BURIOL, Galileo Adeli; SWAROWSKY, Alexandre. Bacia Hidrográfica como Unidade de Gestão Ambiental. **Disciplinarum Scientia**, Série: Ciência Naturais e Tecnológicas, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 159-168, 2012.

BORGES, Vinícius Silva; OLIVEIRA, Wellington Nunes de. Análise multitemporal do uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do rio Meia Ponte. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 17, n. 1, p. 79-93, 2021.

BRASIL. **Decreto nº 4.297, de 10 de julho de 2002**. Regulamenta o art. 9o, inciso II, da Lei no 6.938, de 31 de agosto de 1981, estabelecendo critérios para o Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil - ZEE, e dá outras providências. Brasília, em 10 de julho de 2002; Sub-chefia para Assuntos Jurídicos. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4297.htm. Acesso em: 01 jan. 2024.

BRILHANTE, Ogenis M; CALDAS, Luiz Q. de A. (coords.) **Gestão e avaliação de risco em saúde ambiental.** Rio de Janeiro: Fiocruz, 1999. p. 19-73.

BRÜSEKE, Franz Josef. Risco social, risco ambiental, risco individual. **Ambiente & Sociedade**. Campinas, v. 1, n. 1, p. 117-134, 1997. *Apud*: DAGNINO, Ricardo de Sampaio; CARPI JUNIOR, Salvador. Risco ambiental: conceitos e aplicações. **Climatologia e Estudos da Paisagem**, Rio Claro, v. 2, n. 2, p. 50-87, 2007.

CAMPOS, Sergio; ARAÚJO JÚNIOR, Armindo A.; BARROS, Zacarias X.; CARDOSO, Lincoln G.; PIROLI, Edson L. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao uso da terra em microbacias hidrográficas. Botucatu - SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p.431-435, 2004.

CARVALHO, Andreza Tacyana Felix. Bacia hidrográfica como unidade de planejamento: discussão sobre os impactos da produção social na gestão de recursos hídricos no Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, v. 1, n. 42, p. 140-161, 2020.

CELENTANO, Danielle *et al*. Desmatamento, degradação e violência no “Mosaico Gurupi” - A região mais ameaçada da Amazônia. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 32, n. 92, p. 315-339, 2018.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1999. 236 p. *Apud*: MACIEL, Ana Beatriz Câmara; LIMA, Zuleide Maria Carvalho. O conceito de paisagem: diversidade de olhares. **Rev. Sociedade e Território**. Natal, v. 23, n. 2, p. 159-177, 2011.

COELHO NETO, Ana Luiza. Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia. In: GUERRA, Antônio José Teixeira; CUNHA, Sandra Baptista da (Org.). **Geomorfologia:** uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

CORREIA FILHO, Francisco Lages *et. al.* **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea, estado do Maranhão:** relatório diagnóstico do município de Imperatriz. Teresina: CPRM -Serviço Geológico do Brasil, 2011.

COSTA, Marcondes L. Aspectos Geológicos dos Lateritos da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**, Belém, 21(2): 146-160. 1991. *Apud:* INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS – IMESC. **Relatório técnico de Geologia, Geomoforlogia e Hidrogeologia do Zoneamento Ecológico - Econômico do Estado do Maranhão (ZEE) - Etapa Bioma Amazônico**. São Luís: IMESC, 2019.

COSTA, Marcondes Lima da; FERNANDEZ, Oscar Jesus Choque; REQUELME, Marlis Elena Ramirez. **O depósito de manganês do Azul, Carajás: estratigrafia, mineralogia, geoquímica e evolução geológica**. Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia. Brasília, DNPM, FINEP, ADIMB, p. 227-333, 2005. *Apud:* LOPES, Elem Cristina dos Santos; TEIXEIRA, Sheila Gatinho. Contexto Geológico. In: BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento (Org.) **Geodiversidade do Estado do Maranhão**. Teresina: CPRM, 2013.

CREPANI, Edison et al. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: SAE/INPE, 2001.

CREPANI, Edison; MEDEIROS, José Simeão de; PALMEIRA, Alessandro Ferraz. **Intensidade pluviométrica:** uma maneira de tratar dados pluviométricos para análise da vulnerabilidade de paisagens à perda de solo. São José dos Campos: INPE, 2004, 92 p.

DADOS E INFORMAÇÕES DO SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – GEOSGB. **Litoestratigrafia:** Formação Ipixuna. 2022. Disponível em: https://geosgb.cprm.gov.br/menuoci/index2.php?txtID=81effd2a42c069a15a3ccb4bef4336a0. Acesso em: 03 out. 2022.

DANTAS, Marcelo Eduardo; SHINZATO, Edgar; BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento; SOUZA, Lívia Vargas de; RENK, Jennifer Fortes Cavalcante. Compartimentação Geomorfológico. In: BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento (Org.) **Geodiversidade do Estado do Maranhão**. Teresina: CPRM, 2013.
.

EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília, 2018.

ESPINDOLA, Carlos Roberto. Pedogênese em áreas basálticas de reverso de cuestas no médio curso do Rio Tietê. Fac. Ciências Agronômicas /UNESP, Campus Botucatu, 1979. Tese de Livre Docência. *Apud*: ESPINDOLA, Carlos Roberto; DANIEL, Luiz Antonio. Laterita e solos lateríticos no Brasil. **Boletim Técnico da FATEC-SP**-BT/24, p. 21-24. 2008.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS Desktop***:* Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. 2011.

FEITOSA, Antonio Cordeiro. Relevo do Estado do Maranhão: uma nova proposta de classificação topomorfológica. In: **Simpósio Nacional De Geomorfologia;** Regional Conference on Geomorphology. 2006. p. 1-11.

FERREIRA, Marcelo Dias Paes; COELHO, Alexandre Bragança. Desmatamento recente nos Estados da Amazônia Legal: uma análise da contribuição dos preços agrícolas e das políticas governamentais. **RESR**, Piracicaba-SP, Vol. 53, Nº 01, p. 093-108, Jan/Mar 2015. *Apud:* PEREIRA, Bruno Wendell de Freitas *et al*. Uso da terra e degradação na qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Peixe-Boi, PA, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 11, n. 2, p. 472-485, abr./jun. 2016. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/z4953mJf8JPTmV77569fLmL/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 21 ago. 2022.

FIGUEIRÊDO, Maria Cléa Brito de *et al*. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de reservatórios à eutrofização. **Engenharia sanitária e ambiental**, v. 12, n. 4, p. 399-409, 2007. Disponível em: https://www.scielo.br/j/esa/a/f79cyd4q9VpyCzTLhgFkfVR/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 31 jul. 2022.

FOLHARINI, Saulo de Oliveira; OLIVEIRA, Regina Célia de; FURTADO, André Luiz dos Santos. Vulnerabilidade à perda de solo do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba: contribuição para uma proposta de atribuição de peso. **Boletim Goiano de Geografia**, Maio 2017, v. 37, p. 341–359. DOI: https://doi.org/10.5216/bgg.v37i2.49159.

FURTADO, Ana Maria Medeiros; PONTE, Franciney Carvalho da. Mapeamento de unidades de relevo do Estado do Pará. **Revista GeoAmazônia**, Belém, v. 02, n. 2, p. 56-67, 2013. DOI: 10.17551/2358-1778/geoamazonia.n1v2p56-67

FUSHIMI, Melina. **Vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos lineares de parte dos municípios de Marabá Paulista-SP e Presidente Epitácio-SP**. 2016. 199 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2016.

GONÇALVES, Diogo; PASSOS, Messias Modesto dos. Da sistematização do conhecimento geográfico às diversas análises teóricas da paisagem e do geossistema. **Espaço em Revista**, v. 22, n. 2, p. 29-55, 2020.

GONÇALVES, Ronaldo Antonio; CARVALHO, Ismar de Souza. Contribuição ao estudo da sedimentação da formação Itapecuru, região de Itapecuru-Mirim, bacia do Parnaíba (Cretáceo inferior), Maranhão, Brasil. **Revista de Geologia**, Fortaleza, v. 9, p. 75-81, 1996.

GUIMARÃES, Felipe Silva *et. al*. Uma proposta para automatização do índice de dissecação do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 1, p. 155-167, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/61603/2/Uma%20proposta%20para%20automatiza%c3%a7%c3%a3o%20do%20%c3%adndice%20de%20disseca%c3%a7%c3%a3o%20do%20relevo.pdf. Acesso em: 30 jan. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Banco de Dados de Informações Ambientais – BDIA**. 2022. Base de dados: escala 1:250.000. Disponível em: https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/geomorfologia. Acesso em: 9 jul. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual Técnico de Geomorfologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182p. (Manuais técnicos em geociências, ISSN 0103-9598; n. 5).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual Técnico de uso da terra**. 3ª edição, Rio de Janeiro, 2013.

INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS – IMESC. **Relatório técnico de Geologia, Geomoforlogia e**

**Hidrogeologia do Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Maranhão (ZEE) - Etapa Bioma Amazônico**. São Luís: IMESC, 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos**. 2023. Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/#. Acesso em: 04 jun. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **TOPODATA**: Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. 2011. Disponível em: http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/. Acesso em: 31 ago. 2022.

JÚNIOR, José Fernando Pinese; RODRIGUES, Silvio Carlos. O método de análise hierárquica – AHP – como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Piedade (MG). **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, Brasil, v. 23, p. 4–26, 2012. DOI: 10.7154/RDG.2012.0023.0001. Disponível em: https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47203.. Acesso em: 11 fev. 2023.

JUPIASSÚ, Adélia Maria S. Madeira fóssil – Humiriaceae de Irituia, estado do Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, Belém, n. 14, p. 1-12, 1970. *Apud*: LOPES, Elem Cristina dos Santos; TEIXEIRA, Sheila Gatinho. Contexto Geológico. In: BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento (Org.) **Geodiversidade do Estado do Maranhão**. Teresina: CPRM, 2013.

KAWAKUBO, Fernando Shinji *et. al.* Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. In: **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**; 2005; São José dos Campos. Goiânia: INPE; 2005. p. 2203 – 2210.

LEITE, Emerson Figueiredo; ROSA, Roberto. Análise do uso, ocupação e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Rio Formiga, Tocantins. **OBSERVATORIUM:** Revista Eletrônica de Geografia, v. 4, n. 12, p. 90-106, 2012.

LEOPOLD, Luna Bergere *et al.* A procedure for evaluating environmental impact. **U. S. Geol. Surv. Circ**., 645, Washington D. C., 1971.

LI, Ainong *et. al*. Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS – a case study in the upper reaches of Minjiang River, China. **Ecological Modeling**, v. 192, p. 175–187, 2006. *Apud*: FIGUEIRÊDO, Maria Cléa Brito de *et. al.* **Análise da vulnerabilidade ambiental**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2010.

LIMA, Enjôlras de A. Medeiros; LEITE, Jairo Fonseca. **Projeto estudo global dos recursos minerais da bacia sedimentar do Parnaíba: integração geológico-metalogenética**. Relatório final, etapa III. Belém: DNPM/CPRM, 1978. 190 p. v. 1. *Apud*: LOPES, Elem Cristina dos Santos; TEIXEIRA, Sheila Gatinho. Contexto Geológico. In: BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento (Org.) **Geodiversidade do Estado do Maranhão**. Teresina: CPRM, 2013.

LIMA, Juarez Souza. **Estudo integrado da paisagem, geomorfologia e geotecnologias:** proposta de automatização dos índices de dissecação do relevo. 2018. Monografia (Graduação em Geografia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

LIMA, Walter de Paula. **Hidrologia Florestal Aplicada ao Manejo de Bacias Hidrográficas.** Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2008.

LOPES, Elem Cristina dos Santos; TEIXEIRA, Sheila Gatinho. Contexto Geológico. In: BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento (Org.) **Geodiversidade do Estado do Maranhão**. Teresina: CPRM, 2013.

MACIEL, Ana Beatriz Câmara; LIMA, Zuleide Maria Carvalho. O conceito de paisagem: diversidade de olhares. **Rev. Sociedade e Território**. Natal, v. 23, n. 2, p. 159-177, 2011.

MAPBIOMAS. **Coleção MapBiomas**. 2019b. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1. Acesso em: 31 ago. 2022.

MAPBIOMAS. **O Projeto**. 2019a. Disponível em: https://mapbiomas.org/o-projeto. Acesso em: 31 ago. 2022.

MARCUZZO, Francisco Fernando Noronha; SOUZA, Cecília Jardim Reis; ALMEIDA, Daniel Borges. Bacia hidrográfica internacional do rio Uruguai e consistência dos seus divisores de água na escala 1:3.000. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 48, 2016, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo: SBG, 2016. Disponível: https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/17127/1/5952.pdf. Acesso: 10 ago. 2022.

MAXIMIANO, Liz Abad. Considerações sobre o conceito de paisagem. **RA´E GA**, Curitiba, v. 8, p. 83-91, 2004. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/3391/2719. Acesso em: 22 jun. 2023.

MEDEIROS, Marysol Dantas de; PEREIRA, Vitor Hugo Campelo; ALMEIDA, Lutiane Queiroz de. Áreas de vulnerabilidade ambientalna zona Oeste de Natal/ RN/ Brasil. **Revista GEONORTE**, Manaus, v. 1, n. 4, p.474– 486, 2012. Disponível em: https://periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1849/1727. Acesso em: 22 jun. 2023.

MEDEIROS, Rafael Brugnolli. **Procedimentos metodológicos para análise da vulnerabilidade ambiental em bacias hidrográficas com um estudo de caso da Bacia Hidrográfica do Córrego Moeda, Três Lagoas/MS em 2014**. 2016. 341 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/CPTL, Três Lagoas, 2016.

MEDEIROS, Rafael Brugnolli. **Zoneamento Ambiental para o Sistema Cárstico da Bacia Hidrográfica do Rio Formoso, Mato Grosso do Sul**. 2020. 403 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciências Humanas, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2020.

MORAIS, Roseane Pereira; CARVALHO, Thiago Morato de. Cobertura da terra e parâmetros da paisagem no Munícipio de Caracaraí - Roraima. **Revista Geográfica Acadêmica**, v.7, n.1, p. 46-59, 2013.

MOTA, Suetônio; AQUINO, Marisete Dantas de. Proposta de uma matriz para avaliação de impactos ambientais. In: VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Egenharia sanitaria e ambiental. Vitória-ES. **Anais...** Vitória – ES. 2002.

NETO, Laurindo Chaves. **Gestão das águas no século XXI:** Uma questão de sobrevivência. São Paulo: Atlas, 2005. Disponível em: https://cenedcursos.com.br/meio-ambiente/wp-content/uploads/2008/08/gestao_aguas.pdf. Acesso em: 10 ago. 2022.

OLIVEIRA, Allison Bezerra. Indústria de celulose e o avanço da silvicultura do eucalipto na fronteira agrícola da Amazônia maranhense. **Geosul**, Florianópolis, v. 34, n. 71, p. 301-327. 2019.

PASSOS, Messias Modestos dos. Biogeografia e Paisagem. 2. ed. Maringá: [s.n.], 2003. *Apud:* GONÇALVES, Diogo; PASSOS, Messias Modesto dos. Da sistematização do conhecimento geográfico às diversas análises teóricas da paisagem e do geossistema. **Espaço em Revista**, v. 22, n. 2, p. 29-55, 2020.

PEREIRA, Paulo Roberto Mendes. **As transformações históricas e a dinâmica atual da paisagem do município de Pedro do Rosário, Baixada Maranhense-MA**. 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2017.

PETTS, Geoffrey E.; FOSTER, Ian DL. Rivers and Landscape. The Athenaeum Press, 3 ed., New Castle, Great Britain, 1990. *Apud:* ROCHA, Paulo Cesar; SANTOS, Aline Aparecida dos. Análise Hidrológica em Bacias Hidrográficas. **Mercator**, Fortaleza, v. 17, n. 17025, p. 1-18, 2018.

PIRES, José Salatiel Rodrigues; SANTOS, JE dos; DEL PRETTE, Marcos Estevan. A utilização do conceito de bacia hidrográfica para a conservação dos recursos naturais. In: SCHIAVETTI, Alexandre; CAMARGO, Antonio FM (Orgs.). **Conceitos de bacias hidrográficas:** teorias e aplicações. Ilhéus: Editus, 2002.

PRATES, Rodolfo Coelho; BACHA, Carlos José Caetano. Análise da relação entre desmatamento e o bem-estar da população da Amazônia Legal. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 48, n. 1, p.165- 93, 2010. Disponível em: https://www.scielo.br/j/resr/a/FpkLG6QvJPNSvkgcHdQ5ynK/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 10 mar. 2022.

PYZDEK, Thomas. Instituto. **Folha de cálculo AHP**. 2019. Disponível em: https://www.pyzdekinstitute.com/blog/six-sigma/ahp-spreadsheet.html. Acesso em: 8 abr. 2022.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Desktop 2.18.6.** Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. 2016.

RABELO, Fernando. **Riscos naturais e acção antrópica**. Coimbra: Imprensa da Universidade, 2003. *Apud*: DAGNINO, Ricardo de Sampaio; CARPI JUNIOR, Salvador. Risco ambiental: conceitos e aplicações. **Climatologia e Estudos da Paisagem**, Rio Claro, v. 2, n. 2, p. 50-87, 2007. Disponível em: https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/climatologia/article/view/1026. Acesso em: 11 mai. 2023.

RIBEIRO, Wagner Costa. Riscos e vulnerabilidade urbana no Brasil. Scripta Nova. **Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales**, Universidad de Barcelona, vol. 14, n. 331, 2010.

RODRIGUES T. L. N., ARAUJO C. C., CAMOZZATO E., RAMGRAB G. E. São Luís folha SA.23- Z-A, Cururupu folha SA.23-X-C: estado do Maranhão: escala 1:250.000. Brasília, DF: CPRM, 1994. 185 p. *Apud*: LOPES, Elem Cristina dos Santos; TEIXEIRA, Sheila Gatinho. Contexto Geológico. In: BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento (Org.) **Geodiversidade do Estado do Maranhão**. Teresina: CPRM, 2013.

ROSA, Roberto. **Introdução ao geoprocessamento**. UFU: Apostila. Uberlândia, 2013.

ROSSETTI, Dilce F.; GOES, Ana M.; SOUZA, Lena S. B. Estratigrafia da sucessão sedimentar pós-Barreiras (zona Bragantina, Pará) com base em radar de penetração no solo. Revista brasileira de Geofísica, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 113- 130, 2001. *Apud*: LOPES, Elem Cristina dos Santos; TEIXEIRA, Sheila Gatinho. Contexto Geológico. In: BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento (Org.) **Geodiversidade do Estado do Maranhão**. Teresina: CPRM, 2013.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**. v. 8, p. 63-74. 1994. Disponível em: https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47327/51063. Acesso em: 03 set. 2023.

SAATY, Roseanna W. The analytic hierarchy process – what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3-5, p. 161-76, 1987. *Apud:* PIMENTA, Lianne Borja; BELTRÃO, Norma Ely Santos; GEMAQUE, Amanda Madalena da Silva; TAVARES, Paulo Amador. Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. **Interações,** Campo Grande, v. *20*, n. 2, p. 407-420, 2019. Disponível em: https://www.scielo.br/j/inter/a/czmJyn93szNcX5jfXjpPR8M/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 22 jul. 2022.

SAMPAIO, T. V. M., AUGUSTIN, C. H. R. R. Análise das incongruências dos índices de dissecação e rugosidade. **Anais do VII Encontro Nacional de Geomorfologia**. Belo Horizonte, 2008.

SANTANA, Derli Prudente. **Manejo integrado de bacias hidrográficas**. Sete Lagoas: EMBRAPA Milho e Sorgo, 2003.

SANTOS, Jader de Oliveira. Relações entre Fragilidade Ambiental e Vulnerabilidade Social na susceptibilidade aos riscos. **Mercator**, Fortaleza, v. 14, n. 2, p. 75-90, 2015. Disponível em: https://www.scielo.br/j/mercator/a/sHGwqmtgTYsq55cH6HXkT7B/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 08 jul. 2023.

SANTOS, Luiz Carlos Araujo dos; SOARES, Idevan Gusmão. Caracterização da Vulnerabilidade Ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Preto, Maranhão–Brasil. **Geografia,** Londrina, v. 29, n. 1, p. 85-105, 2020.

SANTOS, Rozely Ferreira dos. **Planejamento ambiental:** teoria e prática. São Paulo: Oficina de textos, 2004.184 p.

SCHIER, Raul Alfredo. Trajetórias do conceito de paisagem na geografia. **RA'E GA**, Curitiba, v. 7, p. 79-85, 2003.

SILVA, Quésia Duarte da. **Mapeamento geomorfológico da Ilha do Maranhão**. 2012. 249 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2012.

SILVEIRA, Emerson Lizandro Dias. Paisagem: um conceito chave em Geografia. In: **12º Encontro de Geógrafos da América Latina - EGAL**, Montevidéo. 2009.

SOARES, Idevan Gusmão. **Análise da Vulnerabilidade Ambiental ao Processo Erosivo como Subsídio ao Planejamento e à Gestão Ambiental na Bacia Hidrográfica do rio Preto – MA**. 2021. 224 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço – PPGEO, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2021.

SOTCHAVA, Viktor Borisovich. O Estudo de Geossistemas. Métodos em questão, 16. IG-USP. São Paulo, 1977. *Apud*: AMORIM, Raul Reis. Um novo olhar na Geografia para os conceitos e aplicações de Geossistemas, Sistemas Antrópicos e Sistemas Ambientais. **Revista Caminhos de Geografia (UFU)**, Uberlândia, v. 13, n. 41, p. 80-101, 2012.

SOUZA, Carina Siqueira de. O papel do zoneamento ambiental no planejamento municipal. **PIDCC**, Aracaju, ano II, n. 4, p. 154 – 175, out/2013.

TAGLIANI, Carlos Roney Armanini. Técnica para avaliação da vulnerabilidade ambiental de ambientes costeiros utilizando um sistema geográfico de informações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais**… BeloHorizonte: INPE, 2003. p. 1657-1664.

TEODORO, Valter Luiz Iost *et al*. O conceito de Bacia Hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista UNIARA**, n. 20, p. 137-157, 2007.

TRICART, Jean. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977. 97 p.

VEIGA JÚNIOR, J. P. São Luís NE/SE, Folhas SA- 23-X e SA-23-Z: Estados do Maranhão e Piauí: escala 1:500.000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos – PLGB. Brasília, DF: CPRM, 2000. *Apud*: INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS – IMESC. **Relatório técnico de Geologia, Geomoforlogia e Hidrogeologia do Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Maranhão (ZEE) - Etapa Bioma Amazônico**. São Luís: IMESC, 2019.

VILLAS BOAS, J.M.; ARAÚJO, C.C. Açailândia, folha Sb.23-V-A: estados do Pará e Maranhão. Brasília, DF: CPRM, 1999. Escala 1:250.000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. 1 CD-ROM. *Apud:* LOPES, Elem Cristina dos Santos; TEIXEIRA, Sheila Gatinho. Contexto Geológico. In: BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento (Org.) **Geodiversidade do Estado do Maranhão**. Teresina: CPRM, 2013.

WEILL, M. A. M.; PIRES NETO, A. G. Erosão e Assoreamento. In: SANTOS, R. F. (Org.). Vulnerabilidade Ambiental. Brasília: MMA, 2007. p. 39-58. *Apud:* FUSHIMI, Melina. **Vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos lineares de parte dos municípios de Marabá Paulista-SP e Presidente Epitácio-SP**. 2016. 199 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2016.

ZAIDAN, Ricardo Tavares. Geoprocessamento Conceitos e Definições. **Revista de Geografia PPGEO-UFJF**, Juiz de Fora, v. 7, n. 2, p. 195-201, 2017.

# ANEXOS

**ANEXO A –** Comparação entre a legenda inicial e atual do projeto Radambrasil (mapa fitoecológico) e os respectivos valores na escala de vulnerabilidade

| ECOSSISTEMA | LEGENDA | | VULN. |
|---|---|---|---|
| | ATUAL | ANTERIOR | |
| Floresta Ombrófila Densa | D | | 1,0 |
| Aluvial | Da | Floresta Densa, planície aluvial (Fdp)<br>Floresta Densa, planície aluvial, periodicamente inundada(Fdp)<br>Floresta Densa, plan. aluvial permanentemente inundada (Fdg)<br>Flor. Ombrófila Densa, aluvial, (Da) | 1,0 |
| - | - | Flor. Ombrófila Densa, aluvial, dossel emergente (Dae) | 1,0 |
| | | Floresta Densa dos terraços (Fdc)<br>Floresta Densa das áreas sedimentares - platô (Fde)<br>Floresta Densa das áreas sedimentares – alto platô (Fde)<br>Floresta Densa, relevo aplainado (Fda)<br>Floresta Densa, relevo dissecado (Fdn)<br>Floresta Densa, baixos platôs (Fdb) | 1,0 |
| Terras Baixas | Db | Floresta Densa, Terras baixas, relevo ondulado (Fdo)<br>Floresta Ombrófila Densa, Terras baixas (Db)<br>Floresta Densa, Terras baixas, platôs (Fdb) | 1,0 |
| Submontana | Ds | Floresta Densa, Submontana, Platô (Fdr)<br>Floresta Densa, Submontana, relevo aplainado (Fdi)<br>Floresta Densa, Submontana, relevo aplainado (Fdn)<br>Floresta Densa, Submontana, relevo dissecado (Fdn)<br>Floresta Densa, Submontana, relevo ondulado (Fdi)<br>Floresta Densa, Submontana, relevo dissecado (Fdi)<br>Floresta Densa, Submontana, acidentado (Fdt) | 1,0 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | Floresta Densa, Submontana, relevo acidentado (Fdt)<br>Floresta Densa, Submontana, relevo ondulado. (Fds)<br>Floresta Densa, Submontana, relevo dissecado (Fdu)<br>Floresta Ombrófila Densa, submontana (Ds)<br>Floresta Densa, Submontana, baixas cadeias de montanhas (Fdt) | |
| dossel emergente | Dse | Floresta Ombrófila Densa, submontana, dossel emergente (Dse) | 1,0 |
| dossel uniforme | Dsu | Floresta Ombrófila Densa, submontana, dossel uniforme (Dsu) | 1,0 |
| Montana | Dm | Floresta Densa, Montana (Fdm)<br>Floresta Densa, Montana, relevo dissecado (Fdm)<br>Floresta Ombrófila Densa Montana (Dm)<br>Floresta Densa, Montana (Fbm)<br>Floresta Densa, Montana, relevo dissecado (Fba) | 1,0 |
| ECOSSISTEMA | LEGENDA | | VULN. |
| | ATUAL | ANTERIOR | |
| Altomontana | Dl | Flor. Ombróf. Densa Alto-Montana (Dl) | 1,0 |
| com dossel uniforme<br>Floresta Ombrófila Aberta | Dlu<br>A | | 1,0<br>1,2 |
| - | - | Floresta Babaçual (Fsb)<br>Floresta Aberta, relevo dissecado (Fan) | |
| - | - | Floresta Aberta, Aluvial, periodicamente inundada (Fap)<br>Floresta Aberta, Aluvial (Fap)<br>Floresta Aberta, Aluvial, permanentemente inundada (Fag)<br>Floresta Aberta, Aluvial, planície (Fag)<br>Floresta Aberta, terraço aluvial (Fac) | 1,2 |
| - | - | Floresta Aberta Mista (Fam)<br>Floresta Aberta Mista (Fal)<br>Floresta Aberta, com palmeiras (Fam)<br>Floresta Aberta latifoliada (Fal) | 1,2 |
| | | Floresta Aberta sem palmeiras (Fam)<br>Floresta Aberta com palmeiras (Fal)<br>Floresta Aberta superfície aplainada (Fal) | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Terras Baixas | Ab | Floresta Aberta, Terras baixas, platô (Fab)<br>Floresta Aberta, Terras baixas, relevo tabular (Fab)<br>Floresta Aberta, Terras baixas, relevo dissecado (Faa)<br>Floresta Aberta, Terras baixas, relevo ondulado (Fao)<br>Floresta Aberta,Terras Baixas, relevo ondulado (Fas) | 1,2 |
| Com Palmeiras | Abp | Floresta Ombrofila Aberta, terras baixas, com palmeiras (Abc) | 1,2 |
| Com Cipó | Abc | Floresta Ombrofila Aberta, terras baixas, com cipós (Abp) | 1,2 |
| Submontana | As | Floresta Aberta, submontana, relevo dissecado (Fan)<br>Floresta Aberta, submontana, relevo dissecado, com palmeiras (Fam)<br>Floresta Aberta, Submontana, Platô (Far)<br>Floresta Aberta, Submontana, relevo dissecado (Fau)<br>Floresta Aberta, Submontana, relevo aplainado (Fai)<br>Floresta Aberta, Submontana, relevo ondulado (Fai)<br>Floresta Aberta, Submontana, relevo dissecado(Fan)<br>Floresta Aberta, Submontana, relevo ondulado (Fas) | 1,2 |
| Com Palmeiras | Asp | Floresta Ombrofila Aberta, submontana, com pameiras (Asp) | 1,2 |
| Com Cipó | Asc | Floresta Ombrofila Aberta, submontana, com cipós (Asc) | 1,2 |
| Com Bambu | Asb | Floresta Ombrofila Aberta, submontana, com bambus (Asb) | 1,2 |
| Com Sororoca | Ass | Floresta Ombrofila Aberta, submontana, com sororoca (Ass) | 1,2 |
| ECOSSISTEMA | LEGENDA | | VULN. |
| | ATUAL | ANTERIOR | |
| Montana | Am | | 1,2 |
| Com Palmeiras | Amp | Floresta Ombrófila Aberta montana com palmeiras (Amp) | 1,2 |
| Com Cipó | Amc | | 1,2 |
| Floresta Ombrófila Mista | M | | 1,3 |
| Aluvial | Ma | | 1,3 |
| Submontana | Ms | Floresta Ombrófila Mista Submontana (Ms) | 1,3 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Montana | Mm | Floresta Ombrófila Mista Montana (Mm) | 1,3 |
| Alto-montana | Ml | Floresta Ombrófila Mista Alto-Montana (Ml) | 1,3 |
| Floresta Estacional Semidecidual | F | | 1,6 |
| - | | Floresta Semidecidual, relevo aplainado (Fsa)<br>Floresta Semidecidual, baixas cadeias de montanhas (Fsd) | 1,6 |
| Aluvial | Fa | Flor. Estacional Semidecidual, aluvial (Fa) | 1,6 |
| Dossel uniforme | Fau | | 1,6 |
| Dossel emergente | Fae | Flor. Estacional Semidecidual, aluvial, dossel emergente (Fae) | 1,6 |
| Terras Baixas | Fb | Flor. Estac. Semidec., terras baixas (Fb) | 1,6 |
| Dossel uniforme | Fbu | | 1,6 |
| Dossel emergente | Fbe | Flor. Estacional Semidecidual, terras baixas, dossel emerg. (Fbe) | 1,6 |
| Submontana | Fs | Floresta Semidecidual, Submontana, relevo dissecado (Fsn)<br>Floresta Semidecidual, relevo aplainado (Fsa)<br>Floresta Estacional Semidecidual, submontana (Fs) | 1,6 |
| Dossel uniforme | Fsu | | 1,6 |
| Dossel emergente | Fse | Flor. Estacional Semidecidual, submontana, dossel emerg. (Fse) | 1,6 |
| Montana | Fm | Floresta Estacional Semidecidual, montana (Fm) | 1,6 |
| Dossel uniforme | Fmu | | 1,6 |
| Dossel emergente | Fma | | 1,6 |
| Floresta Estacional Decidual | C | | 2,2 |
| | | Floresta Decidual latifoliada (Fla)<br>Floresta Decidual mista (Flm<br>Floresta Decidual mista (Fnm)<br>Floresta Decidual nanofoliada (Fna) | 2,2 |
| Aluvial | Ca | Floresta Estacional Decidual Aluvial (Ca) | 2,2 |
| ECOSSISTEMA | LEGENDA | | VULN. |
| | ATUAL | ANTERIOR | |
| Dossel uniforme | Cau | | 2,2 |
| Terras Baixas | Cb | Flor. Estac. Decidual, terras baixas (Cb) | 2,2 |
| Dossel uniforme | Cbu | | 2,2 |
| Dossel emergente | Cbe | Flor. Estac. Decidual, terras baixas, dossel emergente (Cbe) | 2,2 |
| Submontana | Cs | Floresta Estacional Decidual, submontana (Cs) | 2,2 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Dossel uniforme | Csu | | 2,2 |
| Dossel emergente | Cse | Flor. Estacional Decidual, submontana, dossel emergente (Cse) | 2,2 |
| Montana | Cm | Floresta Estacional Decidual, montana (Cm) | 2,2 |
| Dossel uniforme | Cmu | | 2,2 |
| Dossel emergente | Cme | | 2,2 |
| Campinarana | L | | |
| Florestada | Ld | Formação Edáfica Arbórea densa (Pcv)<br>Formação Edáfica Arbórea densa e depressões (Pcv)<br>Floresta Edáfica Depressão, arbórea densa (Cad)<br>Formação Edáfica Arbórea densa planície (Cap)<br>Formação Edáfica Arbórea densa terraços. (Cac)<br>Formação Edáfica Arbórea densa, relevo tabular (Cab)<br>Formação Edáfica Arbórea densa, relevo ondulado (Cao)<br>Formação Edáfica Arbórea densa, terraços e depressões (Pcr)<br>Formação Edáfica Arbórea densa, relevo residual (Pcr)<br>Campinarana arbórea densa, relevo dissecado (Caa)<br>Campinarana arbórea aberta vale (Cbv) | 1,4 |
| Sem Palmeiras | Lds | | 1,4 |
| Com palmeiras | Ldp | | 1,4 |
| Arborizada | La | Formação Edáfica Arbórea aberta (Pcd)<br>Formação Edáfica Arbórea aberta, depressões (Cbd)<br>Campinarana Arbórea aberta, planície (Cbp)<br>Campinarana Arbórea aberta, terraço (Cat)<br>Campinarana arbórea aberta, relevo dissecado (Cba)<br>Campinarana arbórea aberta, relevo ondulado (Cbo) | 1,9 |
| - | | Campinarana Arbustiva, planície (Cup)<br>Campinarana Arbustiva, terraços (Cus)<br>Campinara Depressão, Arbustiva (Cud)<br>Campinarana Arbustiva relevo tabular (Cub) | 2,3 |
| Sem Palmeiras | Las | | 2,3 |
| Com palmeiras | Lap | | 2,3 |
| ECOSSISTEMA | LEGENDA | | VULN. |
| | ATUAL | ANTERIOR | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Gramíneo-Lenhosa | Lg | Campinarana Gramíneo-Lenhosa, depressão (Cgl) | 2,7 |
| Sem Palmeiras | Lgs | | 2,7 |
| Com palmeiras | Lgp | | 2,7 |
| Savana | S | | |
| Florestada | Sd | Cerradão - Sc<br>Savana Arbórea densa (Sad)<br>Savana arbórea densa (Sd) | 1,7 |
| Arborizada | Sa | Campo cerrado - Sr<br>Savana Arbórea aberta (Saa)<br>Savana Arbórea aberta (Sa) | 2,1 |
| Sem flor.-de-galeria | Sas | Savana arbórea aberta sem floresta de galeria (Sas) | 2,1 |
| Com flor.-de-galeria | Saf | Savana arbórea aberta com floresta de galeria (Saf) | 2,1 |
| Parque | Sp | Cerrado parque (Sp)<br>Savana parque (Sp) | 2,5 |
| Sem flor.-de-galeria | Sps | Savana parque sem floresta de galeria (Sps) | 2,5 |
| Com flor.-de-galeria | Spf | Savana parque com floresta de galeria (Spf) | 2,5 |
| Gramíneo-Lenhosa | Sg | Savana gramíneo-lenhosa (Sm)<br>Savana gramíneo-lenhosa (Sg) | 2,7 |
| | | Campo (Sm) | |
| Sem flor.-de-galeria | Sgs | Savana gramíneo-lenhosa sem floresta de galeria (Sgs) | 2,7 |
| Com flor.-de-galeria | Sgf | Savana gramíneo-lenhosa com floresta de galeria (Sgf) | 2,7 |
| Savana estépica | T | | |
| Florestada | Td | Savana Estépica Arbórea densa (Cd)<br>Savana Estépica arbórea densa (Td) | 1,7 |
| Arborizada | Ta | Savana Estépica Arbórea aberta (Ca) | 2,1 |
| Sem flor.-de-galeria | Tas | Savana Estépica Arborizada sem floresta de galeria (Tas) | 2,1 |
| Com flor.-de-galeria | Taf | Savana Estépica Arborizada com floresta de galeria (Taf) | 2,1 |
| Parque | Tp | Savana Estépica parque (Cp) | 2,5 |
| Sem flor.-de-galeria | Tps | Savana Estépica Parque sem floresta de galeria (Tps) | 2,5 |
| Com flor.-de-galeria | Tpf | Savana Estépica Parque com floresta de galeria (Tpf) | 2,5 |
| Gramíneo-Lenhosa | Tg | Savana Estépica Gramíneo-lenhosa (Tg) | 2,7 |
| Sem flor.-de-galeria | Tgs | Savana Estépica Gramíneo-lenhosa sem floresta de galeria (Tgs) | 2,7 |
| Com flor.-de-galeria | Tgf | Savana Estépica Gramíneo-lenhosa com floresta de galeria (Tgf) | 2,7 |
| Estepe | E | | |

| ECOSSISTEMA | LEGENDA | | VULN. |
|---|---|---|---|
| | ATUAL | ANTERIOR | |
| - | | Caatinga arbórea (Ea)<br>Caatinga arbustiva (Eu)<br>Estepe arbórea densa, sem palmeiras (Eds)<br>Estepe arbórea densa, com palmeiras (Edp)<br>Estepe arbórea aberta, sem palmeiras (Eas)<br>Estepe arbórea aberta, com palmeiras (Eap) | 1,7<br>2,3<br>1,7<br>1,7<br>2,1<br>2,1 |
| Arborizada | Ea | Estepe arbórea aberta (Ea) | 2,1 |
| Arborizada sem floresta-de-galeria | Eas | | 2,1 |
| Arborizada com floresta-de-galeria | Eaf | | 2,1 |
| Parque | Ep | Caatinga parque (Ep) | 2,5 |
| | | Estepe parque (Ep) | |
| - | | Estepe parque sem palmeiras (Eps) | 2,5 |
| - | | Estepe parque com palmeiras (Epp) | 2,5 |
| Sem flor.-de-galeria | Eps | | 2,5 |
| Com flor.-de-galeria | Epf | | 2,5 |
| Gramíneo-Lenhosa | Eg | Estepe Gramíneo-Lenhosa (Eg) | 2,7 |
| Sem flor.-de-galeria | Egs | | 2,7 |
| Com flor.-de-galeria | Egf | Estepe Gramíneo-Lenhosa com floresa-de-galeria(Eg) | 2,7 |
| Veg. c/ infl. marinha (Restinga) | Pm | Formação Pioneira - Restinga - Pr<br>Formação Pioneira,-influência marinha, restinga (Pm) | - |
| Arbórea (pont. rochoso) | Pma | Formação Pioneira,-influência marinha, restinga, arbórea (Pma) | 1,4 |
| Arbustiva (das dunas) | Pmb | Form. Pioneira, influência marinha, restinga, arbustiva (Pmb) | 2,3 |
| Herbácea (das praias) | Pmh | Form. Pioneira, influência marinha, restinga, herbácea (Pmh) | 2,7 |
| Veg. com infl. fluviomarinha | Pf | | |
| Arbórea (Maguezal) | Pfm | Formação Pioneira- Manguezal - (Pm)<br>Formação Pioneira, influência marinha, mangue, arbórea (Pfm) | 1,4 |
| - | - | Formação Pioneira, influência fluviomarinha, arbórea (Pfm) | 1,4 |
| Herbácea (Plan. mar.) | Pfh | Formação Pioneira, influência fluviomarinha, herbácea (Pfh) | 2,7 |
| - | - | Formação Pioneira, influência fluviomarinha, herbácea, sem palmeiras (Phs) | 2,7 |
| Veg. c/ infl. fluv. e/ou lacustre | Pa | | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Buritizal | Pab | Formação Pioneira, influência fluvial buritizal (Pfb) | 1,8 |
| ECOSSISTEMA | LEGENDA | | VULN. |
| | ATUAL | ANTERIOR | |
| | | Formação Pioneira Arbórea com palmeiras (Pp)<br>Formação Pioneira Arbórea sem palmeiras (Pl) | |
| | | Formação Edáfica Palustre Depressão Arbórea (Pap)<br>Formação Pioneira Arbórea planície peirod. inundada (Pap)<br>Formação Pioneira arbórea planície periodicam. inundada (Pap)<br>Formação Pioneira Arbórea, periodicamente inundada (Pap)<br>Formação Pion. arbórea, áreas permanentemente inundada (Pal) | 1,4 |
| Arbustiva | Paa | Formação Pioneira - arbustiva (Pa)<br>Formação Edáfica Palustre Depressão Arbustiva (Pau)<br>Formação Pioneira Arbustiva, periodicamente inundada (Pau)<br>Formação Edáfica arbustiva permanente inundada (Pae)<br>Formação Pioneira arbustiva depressões perman. inundada (Pae)<br>Formação Pioneira, arbustiva, terraços (Pac)<br>For. Pion. infl. Fluvial, arbustiva com palmeiras (Pap) | 2,3 |
| Sem palmeiras | Pas | Form. Pioneira, influência fluvial, arbustiva, sem palmeiras (Pfs)<br>Form. Pioneira, influência fluvial, arbustiva, sem palmeiras (Pas) | 2,3 |
| Com palmeiras | Pap | Form. Pioneira, influência fluvial, arbustiva, com palmeiras (Pfs)<br>Form. Pioneira, influência fluvial, arbustiva, com palmeiras (Pap) | 2,3 |
| Herbácea | Ph | Formação Pioneira - campestre - Pc<br>Formação Edáfica Palustre Depressão gramínea (Pag)<br>Formação Pioneira Graminosa, permanentemente inudada (Pag)<br>Formação Pioneira Graminosa, depressão, permanentemente inudada (Pag)<br>Formação Pioneira influência fluvial graminóide (Phf) | 2,7 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Sem palmeiras | Phs | Form. Pioneira influên. fluvial, herbácea, sem palmeiras (Phs) | 2,7 |
| Com palmeiras | Php | | 2,7 |
| Refúgio montano | Rm | Refúgio montano (rm) | |
| arbustivos | Rmb | Veg. Escleróf.-submediterrâneo (Vm)<br>Refugio Carrasco (Cr) | 2,3 |
| | | Refúgio arbustivo (Rta)<br>Refúgio Rosário Secundária latioliada - (RFsl) | |
| ECOSSISTEMA | LEGENDA | | VULN. |
| | ATUAL | ANTERIOR | |
| herbáceo | Rmh | Refúgio Tingua- Secundária mista - Tfsm<br>Refúgio montano herbáceo (rmh) | 2,7 |
| Refúgio alto-montano | Rl | Refúgio Alto-Montano (rl) | |
| arbustivos | Rlb | Refúgio arbustivo (Va)<br>Refúgio Alto-Montano, arbustivo (rlb) | 2,3 |
| herbáceo | Rlh | Refúgio herbáceo (Ph)<br>Refúgio graminoso (Pg)<br>Refúgio Alto-Montano herbáceo (rlh)<br>Refúgio Alto-Montano herbáceo (rah) | 2,7 |
| Vegetação secundária | Vs | | * |
| sem palmeiras | Vss | Secundária latifoliada (Fsl)<br>Vegetação secundária sem palmeiras (Vss) | * |
| com palmeiras | Vsp | Secundária mista (Fsm)<br>Vegetação secundária com palmeiras (Vsp) | * |

**Fonte:** Crepani *et. al.* (2001).

**ANEXO B –** IMIRANTE.COM. **Entenda o que são voçorocas, enormes crateras que já 'engoliram' casas e ameaçam bairros em cidades do Maranhão**. 2023. Disponível em: https://imirante.com/noticias/buriticupu/2023/05/02/entenda-o-que-sao-as-vocorocas-enormes-crateras-que-ja-engoliram-casas-e-ameacam-bairros-em-cidades-do-maranhao. Acesso em: fevereiro de 2024.

imirante.com ENTRAR

FENÔMENO GEOLÓGICO

# Entenda o que são as voçorocas, enormes crateras que já 'engoliram' casas e ameaçam bairros em cidades do Maranhão

As voçorocas chamam atenção devido à profundidade e o risco provocado aos moradores que vivem em áreas próximas.

Imirante.com
02/05/2023 às 17h36

Voçoroca ameaça 'engolir' casas em cidades do Maranhão. (reprodução / JN)

**BURITICUPU** - Os enormes abismos que chegam até 70 metros de altura e 500 metros de comprimento, conhecidos como voçorocas, ganharam repercussão nacional após ameaçar 'engolir' casas e bairros inteiros em cidades do Maranhão.

As voçorocas chamam atenção devido à profundidade e o risco provocado aos moradores que vivem em áreas próximas. Na madrugada desta terça-feira (2), **um policial militar aposentado ficou ferido após cair dentro de uma dessas crateras**, a uma profundidade de cerca de 80 metros, em Buriticupu, cidade a 415 km de São Luís, e uma das mais afetadas pelo fenômeno.

Mesmo com a repercussão recente do caso das voçorocas, os primeiros registros desse tipo de erosão tiveram início por volta da década de 1980 no Maranhão.

Em Buriticupu, por exemplo, as crateras se formaram a partir da rápida expansão urbana e como consequência do desmatamento da vegetação nativa em áreas de alta declividade, é o que explica o professor Fernando Bezerra, do programa de pós-graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço, da Universidade Estadual do Maranhão (Uema).

**Voçorocas**

As crateras são pequenos fenômenos geológicos que surgem como fendas no solo, geralmente provocadas pela água da chuva. Se nada é feito para conter, uma cratera pode chegar ao grau de voçoroca, quando atinge um lençol freático.

Essas crateras surgem a partir de processos de erosão acelerados pela ação da chuva, devido às enxurradas, em áreas com solos sem cobertura vegetal.

Segundo o professor Fernando Bezerra, o surgimento de novas crateras podem ser prevenidas para evitar tragédias de maiores proporções. Para isso, é necessário investir na proteção do solo com a cobertura da manutenção vegetal da área próxima, principalmente em locais com alta declividade e próximo as nascentes de rios.

Além disso, deve-se evitar queimadas e desmatamento em áreas próximas, devido à instabilidade do solo. E para uma maior eficácia, as autoridades também precisam investir em infraestrutura com esgotamento sanitário, drenagem urbana e retirar da região a população em torno das cabeceiras das crateras.

**Imóveis engolidos**

Nos últimos 10 anos, **só uma voçoroca engoliu três ruas e mais de 50 casas em Buriticupu**. Parte da Vila Santos Dumont desapareceu completamente e as casas que ainda não desabaram estão próximas aos barrancos e foram abandonadas. A família do serralheiro João Otávio Farias perdeu 14 casas de aluguel.