

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CÂMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE**

Matheus Vargas de Oliveira

**FRAGILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARDO:
DIFUSÃO DE INFORMAÇÕES E APOIO À GESTÃO TERRITORIAL**

Presidente Prudente - SP
2025

Matheus Vargas de Oliveira

**FRAGILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARDO:
DIFUSÃO DE INFORMAÇÕES E APOIO À GESTÃO TERRITORIAL**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências e Tecnologia - UNESP, como
parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Ciências

Orientador: Prof. Dr. Edson Luís Pirolí

Presidente Prudente - SP
2025

V297f	Vargas de Oliveira, Matheus Fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo : difusão de informações e apoio à gestão territorial / Matheus Vargas de Oliveira. -- Presidente Prudente, 2026 94 p. : il., tabs., mapas + aplicativo + e-book Dissertação (Mestrado profissional - Geografia Profissional) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente Orientador: Edson Luís Piroli 1. Fragilidade ambiental. 2. Análise multicritério. 3. AHP. 4. Recursos hídricos. 5. Atlas. I. Título.
-------	---



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA
DISSERTAÇÃO:

Fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo: difusão de
informações e apoio à gestão territorial

AUTOR: MATHEUS VARGAS DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: EDSON LUÍS PIROLI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências, área:
Recursos Hídricos e Meio Ambiente pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **EDSON LUIS PIROLI**
Data: 18/12/2025 10:04:34-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. EDSON LUÍS PIROLI (Participação Presencial)

Departamento de Geografia e Planejamento / UNESP / Câmpus de Ourinhos - FCTE

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO LILLA MANZIONE**
Data: 18/12/2025 10:11:19-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. RODRIGO LILLA MANZIONE (Participação Presencial)

Departamento de Geografia e Planejamento / UNESP / Câmpus de Ourinhos - FCTE

Documento assinado digitalmente
 **DONIZETI APARECIDO PASTORI NICOLETE**
Data: 18/12/2025 11:43:44-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. DONIZETI APARECIDO PASTORI NICOLETE (Participação Presencial)

Departamento de Geografia e Planejamento / UNESP / Câmpus de Ourinhos - FCTE

Presidente Prudente, 17 de dezembro de 2025.

Aos meus sobrinhos,

Manuela, Helena e Henrique Vargas,
que pela curiosidade e pelo brilho nos olhos,
me lembram, todos os dias,
que qualquer desafio pode ser superado.

AGRADECIMENTOS

Reúno aqui algumas coisas que aprendi estudando recursos hídricos e meio ambiente nesses últimos tempos, fazendo mapas e me reencontrando como geógrafo. Portanto, tenho muito a agradecer.

Os primeiros agradecimentos são dedicados àquela que me motivou em todos os dias de minha vida e que me deu esperança e condições de chegar até o presente momento, minha mãe, Elieth Vargas, por todo amor e zelo investidos em mim. Foi ela quem me ensinou a ver o mundo com o encantamento de quem não conhece limites para os sonhos.

Ao meu pai, Expedito Alves (in memoriam), que primeiro me ensinou a viver com valores de unicidade e colaboração.

Agradeço também ao meu irmão, Diego Vargas, pelo companheirismo, e aos meus sobrinhos, Manuela, Helena e Henrique Vargas, cuja luz, alegria e curiosidade me inspiram diariamente a acreditar na educação como agente transformador. Que este trabalho seja, para vocês, uma lembrança de que o conhecimento abre caminhos e de que sempre vale a pena seguir aprendendo.

Aos meus amores de quatro patas, Mel e Lola, por colocarem um sorriso em meu rosto após as viagens cansativas para Prudente. Estendo o carinho à Petra, que me acompanha agora, neste processo de revisão do trabalho.

À Unesp e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia - Mestrado Profissional, pela oportunidade concedida para a realização deste curso, permitindo a concretização de um sonho e a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aos amigos Estêvão Zilioli e Glaucia Turcato, por serem os primeiros a comemorarem comigo o começo e agora o fim desta jornada.

Aos amigos, Rafa Nunes, Andressa Navarro, Larissa Souza, Breno Pagani, Lyvia Moura e Carol Brizotti, amigos que não permitiram que eu desistisse.

Em especial, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Edson Luís Piroli, pela oportunidade, serenidade e carinho ao compartilhar comigo sua vasta sabedoria e vivências durante toda a minha trajetória.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, muito obrigado!

“Os mapas são uma forma de comunicar um conhecimento...
São veículos...
Representações gráficas de determinado espaço geográfico, concebidos para
transmitir a visão subjetiva ou o conhecimento de alguém ou de poucos para
muitos.”

Ruth Nogueira, 2006.

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo (BHRP), localizada no centro-sul do estado de São Paulo, com vistas a identificar áreas suscetíveis a processos degradacionais e subsidiar ações de planejamento territorial e gestão ambiental. Para isso, empregou-se uma abordagem integrada baseada em geotecnologias, técnicas de geoprocessamento e Análise Multicritério (AMC), utilizando o *método Analytic Hierarchy Process* (AHP) para determinar a importância relativa dos fatores ambientais. Foram considerados os seguintes critérios: uso e cobertura da terra, declividade, precipitação, geologia e solos. A modelagem espacial foi realizada no software QGIS, e os resultados foram integrados por Combinação Linear Ponderada (CLP), resultando em mapas de fragilidade emergente. Adicionalmente, o estudo desenvolveu um Atlas Digital de fragilidade ambiental, disponibilizado em formato web (Google Sites) e complementado por um aplicativo interativo no Google Earth Engine, ampliando o acesso aos dados e favorecendo a democratização do conhecimento ambiental. Os resultados indicaram que a maior parte da área da bacia se enquadra nas classes de fragilidade baixa (40,58%) e média (35,92%), enquanto as áreas classificadas como alta fragilidade correspondem a 10,99% do território, associadas principalmente a setores de maior declividade e intensificação do uso agropecuário. A classe de fragilidade muito baixa abrange 12,35%, e a de fragilidade muito alta apresentou reduzida expressão espacial, com apenas 0,16%, evidenciando que a pressão antrópica atua de forma localizada, porém significativa, especialmente nos trechos a montante da bacia, onde se concentram áreas de recarga hídrica e cabeceiras de drenagem. Do ponto de vista social e ambiental, os produtos gerados constituem ferramentas estratégicas de apoio à tomada de decisão, capazes de orientar políticas públicas relativas ao uso racional da água, contenção de processos erosivos, proteção de nascentes e manejo sustentável do solo e da vegetação nativa. As análises desenvolvidas reforçam a importância da gestão integrada de bacias e fortalecem o elo entre pesquisa científica e práticas de gestão territorial, promovendo maior segurança hídrica e ambiental para os municípios inseridos na BHRP.

Palavras-chave: Fragilidade ambiental; Análise Multicritério; AHP; Recursos hídricos; Atlas

ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the environmental fragility of the Rio Pardo Watershed (BHRP), located in the south-central region of the state of São Paulo, aiming to identify areas susceptible to degradation processes and to support territorial planning and environmental management actions. To this end, an integrated approach based on geotechnologies, geoprocessing techniques, and Multicriteria Analysis (MCA) was employed, using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method to determine the relative importance of environmental factors. The following criteria were considered: land use and land cover, slope, precipitation, geology, and soils. Spatial modeling was performed using QGIS software, and the results were integrated through Weighted Linear Combination (WLC), resulting in emergent fragility maps. Additionally, the study developed a Digital Atlas of environmental fragility, made available in web format (Google Sites) and complemented by an interactive application in Google Earth Engine, expanding access to data and promoting the democratization of environmental knowledge. The results indicated that the majority of the watershed area falls into the low (40.58%) and medium (35.92%) fragility classes, while areas classified as high fragility correspond to 10.99% of the territory, primarily associated with sectors of steeper slopes and intensified agricultural use. The very low fragility class covers 12.35%, and the very high fragility class presented reduced spatial expression, with only 0.16%, showing that anthropogenic pressure acts in a localized yet significant manner, especially in the upstream sections of the watershed, where groundwater recharge areas and drainage headwaters are concentrated. From a social and environmental perspective, the generated products constitute strategic decision-support tools, capable of guiding public policies related to the rational use of water, containment of erosive processes, protection of springs, and sustainable management of soil and native vegetation. The developed analyses reinforce the importance of integrated watershed management and strengthen the link between scientific research and territorial management practices, promoting greater water and environmental security for the municipalities within the BHRP.

Keywords: Environmental fragility; Multicriteria Analysis; AHP; Water resources; Atlas

LISTA DE FIGURAS E DE GRÁFICOS

Figura 1. O ciclo da água.....	16
Figura 2. Fluxo da relação sociedade/natureza.....	21
Figura 3. Localização da BHRP no contexto da Região Hidrográfica do Paraná e da UGRHI-17.....	26
Figura 4. Mapa de localização da BHRP.	27
Figura 5. Mapa de localização dos municípios com território na BHRP.....	28
Figura 6. Mapa dos Municípios com sede dentro da BHRP.....	29
Figura 7. Mapa populacional da BHRP.....	31
Figura 8. Mapa hipsométrico da BHRP.....	32
Figura 9. Perfil longitudinal do Rio Pardo.	33
Figura 10. Fluxograma metodológico: modelo de mapeamento da fragilidade ambiental.....	34
Figura 11. Mapa da distribuição pluviométrica na BHRP.	52
Figura 12. Mapa de fragilidade frente ao fator pluviométrico.....	53
Figura 13. Mapa de declividade da BHRP.	55
Figura 14. Mapa de fragilidade frente ao fator declividade.....	57
Figura 15. Mapa de uso e ocupação da terra na BHRP.	59
Figura 16. Mapa de fragilidade frente ao fator uso e ocupação.....	61
Figura 17. Mapa de solos da BHRP.....	64
Figura 18. Mapa de fragilidade frente ao fator solo.	65
Figura 19. Mapa geológico da BHRP.....	67
Figura 20. Mapa de fragilidade frente ao fator geologia.	69
Figura 21. Mapa de fragilidade ambiental emergente da BHRP.....	74
Figura 22. Mapa de fragilidade alta e muito alta da BHRP.	76
Gráfico 1. Percentual da bacia hidrográfica em cada município.....	31
Gráfico 2. Média pluviométrica nas estações meteorológicas localizadas nos municípios da bacia.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Área dos municípios e suas respectivas participações na BHRP.....	30
Tabela 2. Características das bandas dos sensores WPM - CBERS 04A.	36
Tabela 3. Atributos ambientais utilizados para as análises realizadas.	37
Tabela 4. Notas e classes de fragilidade.....	40
Tabela 5. Classes de fragilidade por variável pluviométrica.....	41
Tabela 6. Classes de fragilidade para a variável declividade.....	42
Tabela 7. Classes de fragilidade para a variável uso e ocupação.	43
Tabela 8. Classes de fragilidade para a variável solo.	44
Tabela 9. Classes de fragilidade para a variável geologia.	45
Tabela 10. Matriz de comparação pareada.....	46
Tabela 11. Escala de valores para a comparação pareada.	46
Tabela 12. Índice Randômico (RI) para matrizes de diferentes ordens (n).	48
Tabela 13. Precipitação pluviométrica nas estações meteorológicas da bacia.	51
Tabela 14. Declividade da Bacia do Rio Pardo.	56
Tabela 15. Notas e classes de fragilidade atribuídas ao fator declividade.	57
Tabela 16. Uso e ocupação da terra na BHRP.....	60
Tabela 17. Notas e classes de fragilidade atribuídas ao fator uso e ocupação.....	62
Tabela 18. Classes de solos da BHRP.....	64
Tabela 19. Notas e classes de fragilidade atribuídas ao fator solo.	66
Tabela 20. Tabela geológica com as unidades litoestratigráficas da bacia.	67
Tabela 21. Unidades litoestratigráficas da BHRP.....	68
Tabela 22. Notas e classes de fragilidade atribuídas ao fator geologia.	69
Tabela 23. Matriz de comparação pareada.....	70
Tabela 24. Pesos atribuídos aos fatores adotados.	71
Tabela 25. Fragilidade ambiental da BHRP.....	75
Tabela 26. Notas e classes de fragilidade atribuídas ao fator solo de todos os municípios da bacia.....	79
Tabela 27. Notas e classes de fragilidade atribuídas ao fator geologia de todos os municípios da bacia.....	79

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AHP	Processo Hierárquico Analítico
ALOS	<i>Advanced Land Observing Satellite</i>
AMC	Análise Multicritério
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
art.	Artigo
BHRP	Bacia Hidrográfica do Rio Pardo
CBERS	China-Brazil Earth-Resources Satellite
CBH	Comitê de Bacias Hidrográficas
CBH-MP	Comitê de Bacia Hidrográfica - Médio Paranapanema
CLP	Combinação Linear Ponderada
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
EIA/RIMA	Estudo de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto Ambiental
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PI	Plano de Informação
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PRISM	<i>Panchromatic Remote-Sensing Instrument for Stereo Mapping</i>
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
UGRHI	Unidade de Gestão de Recursos Hídricos
UPH	Unidade de Planejamento Hídrico
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
WPM	Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivos específicos	14
3 REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1 Bacias hidrográficas como unidade de planejamento territorial	15
3.2 Fragilidade ambiental e geotecnologias aplicadas ao planejamento territorial	18
3.3 Análise multicritério como suporte à tomada de decisão	22
4 MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 Contextualização da área de estudo	26
4.2 Materiais	33
4.2.1 Roteiro metodológico	33
4.2.2 Elaboração da base de dados	34
4.2.3 Aplicativos computacionais	38
4.3 Metodologia de análise	39
4.3.1 Etapa de tratamento, recorte e integração dos dados	39
4.3.2 Padronização dos fatores	39
4.3.3 Aplicação do Processo Hierárquico Analítico	45
4.3.4 Combinação Linear Ponderada e geração do mapa de fragilidade	48
4.3.5 Criação do atlas digital	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1 Fatores de análise e procedimentos de padronização	50
5.1.1 Pluviometria da BHRP	50
5.1.2 Declividade da BHRP	53
5.1.3 Uso e ocupação da BHRP	57

5.1.4	Pedologia da BHRP	62
5.1.5	Geologia da BHRP	66
5.2	Fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo	70
5.2.1	Processo de Hierarquia Analítica da bacia	70
5.2.2	Mapa de fragilidade ambiental da bacia	73
5.3	Fragilidade ambiental, manejo e planejamento territorial na BHRP	75
5.4	Atlas digital de fragilidade ambiental da BHRP	78
6	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICE – ATLAS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DA BHRP	90

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a intensificação das atividades humanas sobre o meio tem ampliado os conflitos entre a manutenção dos processos naturais e a crescente demanda social por recursos. A combinação entre o aumento populacional, a urbanização acelerada e a expansão agroindustrial tem gerado pressões cada vez mais intensas sobre sistemas ambientais, especialmente sobre os recursos hídricos, cuja disponibilidade e qualidade vêm sendo gradativamente reduzidas (Traficante et al., 2017). Essa situação é agravada por modelos de ocupação pouco alinhados ao planejamento territorial, resultando em desequilíbrios ecossistêmicos e ampliação de riscos ambientais.

No contexto brasileiro, tais processos são reforçados por vulnerabilidades estruturais na governança ambiental. A instabilidade das políticas públicas e a insuficiência de ações integradas dificultam a consolidação de estratégias de manejo capazes de garantir a segurança hídrica e o uso sustentável da terra (De Lima, 2016). Essa realidade demanda que o planejamento ambiental seja fundamentado em abordagens sistêmicas, que considerem de forma simultânea a dinâmica biofísica e as formas de apropriação do espaço.

A bacia hidrográfica se apresenta, nesse cenário, como unidade privilegiada de análise. Por constituir um sistema espacial que integra os fluxos hídricos, energéticos e socioeconômicos, ela possibilita uma leitura territorial que explicita as relações de causa e efeito entre as características físicas e os impactos da ação humana (Piroli, 2002). Assim, torna-se referência para o ordenamento territorial e para a gestão ambiental descentralizada, conforme instituído pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH, Lei nº 9.433/1997).

Os estudos de fragilidade ambiental emergem como instrumentos essenciais dentro desse marco. Ao identificar e espacializar áreas mais suscetíveis à degradação, esses estudos permitem antecipar cenários de risco, orientar políticas de prevenção e direcionar recursos para áreas prioritárias. Nesse sentido, metodologias baseadas em geotecnologias e Análise Multicritério (AMC) têm se destacado pela capacidade de integrar dados ambientais diversos, resultando em representações cartográficas para a tomada de decisão.

O presente estudo insere-se nessa perspectiva ao realizar o mapeamento da fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo (BHRP), localizada no

centro-sul do estado de São Paulo. Essa bacia apresenta importância estratégica no contexto regional, devido ao abastecimento público, à presença de polos agroindustriais e ao desenvolvimento urbano crescente. Entretanto, nas últimas décadas, a BHRP tem evidenciado sinais claros de estresse hídrico. O episódio crítico registrado em 2021, quando o leito do Rio Pardo apresentou mínima histórica na região de Ourinhos, comprometeu o abastecimento de cerca de 100 mil habitantes, configurando o maior colapso hídrico já documentado em sua história (Piroli, 2022).

A crise reflete um conjunto de pressões territoriais recorrentes, com superexploração dos recursos hídricos, sobretudo por sistemas de irrigação e perfuração de poços; implantação de barramentos, como a PCH Ponte Branca, que altera a conectividade do sistema fluvial e promove perda de áreas de mata ciliar; degradação do solo rural, que intensifica processos erosivos e assoreamento; e expansão urbana desordenada, com impermeabilização maciça e deficiências crônicas na drenagem pluvial, resultando em eventos erosivos severos.

Esses agravantes indicam a urgência de estratégias de manejo integrado voltadas à conservação dos processos hidrológicos e geomorfológicos da bacia, condição essencial para o equilíbrio entre as demandas humanas e a manutenção dos ecossistemas.

Ao integrar Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e AMC com base em fatores condicionantes do relevo, solo, cobertura e uso da terra, geologia e pluviosidade, este trabalho busca fortalecer a capacidade técnica de diagnóstico da fragilidade ambiental na bacia. Paralelamente, os resultados são organizados e disponibilizados em um atlas digital interativo, com o objetivo de democratizar o acesso às informações e subsidiar políticas públicas municipais e ações de educação ambiental.

Assim, ao focar na identificação de áreas suscetíveis, dialoga diretamente com os compromissos internacionais de sustentabilidade. A pesquisa está alinhada a dois Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU Brasil, 2022). Esses objetivos incluem:

- ODS 6 (Água Potável e Saneamento), em particular a meta 6.5 - “Até 2030, implementar a gestão integrada dos recursos hídricos em todos os níveis, inclusive via cooperação transfronteiriça, conforme apropriado”.

- ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), em particular a meta 11.5 - “ Até 2030, reduzir significativamente o número de mortes e o número de pessoas afetadas por catástrofes e substancialmente diminuir as perdas econômicas diretas causadas por elas em relação ao produto interno bruto global, incluindo os desastres relacionados à água, com o foco em proteger os pobres e as pessoas em situação de vulnerabilidade”.

A abordagem metodológica do estudo é orientada por princípios transdisciplinares, articulando os condicionantes do tempo histórico, marcado pelas ações antrópicas, e do tempo natural, determinado pelos processos ambientais dinâmicos. Ao integrar essas dimensões, o projeto busca ampliar a percepção e o acesso à informação técnica, reduzindo as disparidades informacionais no planejamento ambiental e promovendo práticas de manejo mais conscientes e sustentáveis.

A aplicação do modelo ocorreu na BHRP, situada na região do Médio Paranapanema, cuja seleção se justifica pela sua inserção nos temas prioritários estabelecidos pelo CBH-MP, em consonância com o escopo do Programa de Pós-Graduação em Geografia – Mestrado Profissional. Dentre esses temas, destaca-se o Tema 3 (Recuperação de áreas degradadas e recuperação florestal), que contempla ações prioritárias voltadas à análise de áreas suscetíveis a degradação ambiental, ao monitoramento hidrológico, ao uso da terra e às interferências em eventos extremos, todas de alta relevância para o planejamento territorial da região.

Os resultados incluem a geração de mapas temáticos de fragilidade ambiental, integrados em um atlas digital, que será disponibilizado como instrumento técnico de apoio à gestão pública. Esses produtos servirão de base para políticas de remediação em áreas urbanizadas e para estratégias de prevenção em áreas não urbanas, contribuindo para o fortalecimento do vínculo entre o conhecimento científico e a tomada de decisão no contexto da gestão ambiental integrada.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar a fragilidade ambiental da BHRP utilizando geotecnologias e AMC, com a elaboração de um atlas digital que subsidie ações de planejamento territorial e segurança hídrica.

2.2 Objetivos específicos

Com o intuito de alcançar o propósito desta pesquisa, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- a) organizar um banco de dados geoespacial integrando variáveis ambientais e antrópicas relevantes da BHRP;
- b) identificar, classificar e mapear os graus de fragilidade ambiental da bacia, considerando fatores como pluviometria, declividade, uso e cobertura da terra, solo e geologia;
- c) examinar a influência das práticas antrópicas na intensificação de processos degradacionais, como erosão, e suas implicações para os recursos hídricos;
- d) elaborar um atlas digital de fragilidade ambiental, com mapas temáticos, gráficos e análises integradas por município, a fim de subsidiar o planejamento territorial.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Bacias hidrográficas como unidade de planejamento territorial

Uma bacia hidrográfica pode ser compreendida como uma área de captação natural das águas de precipitação, na qual o escoamento superficial converge para um único ponto de saída, resultando em uma rede de drenagem interligada. Em termos sistêmicos, esse conceito é ampliado, pois a bacia reúne superfícies, vertentes e cursos d'água que se integram em um exutório comum (Tucci; Bertoni, 2003).

De acordo com Porto e Porto:

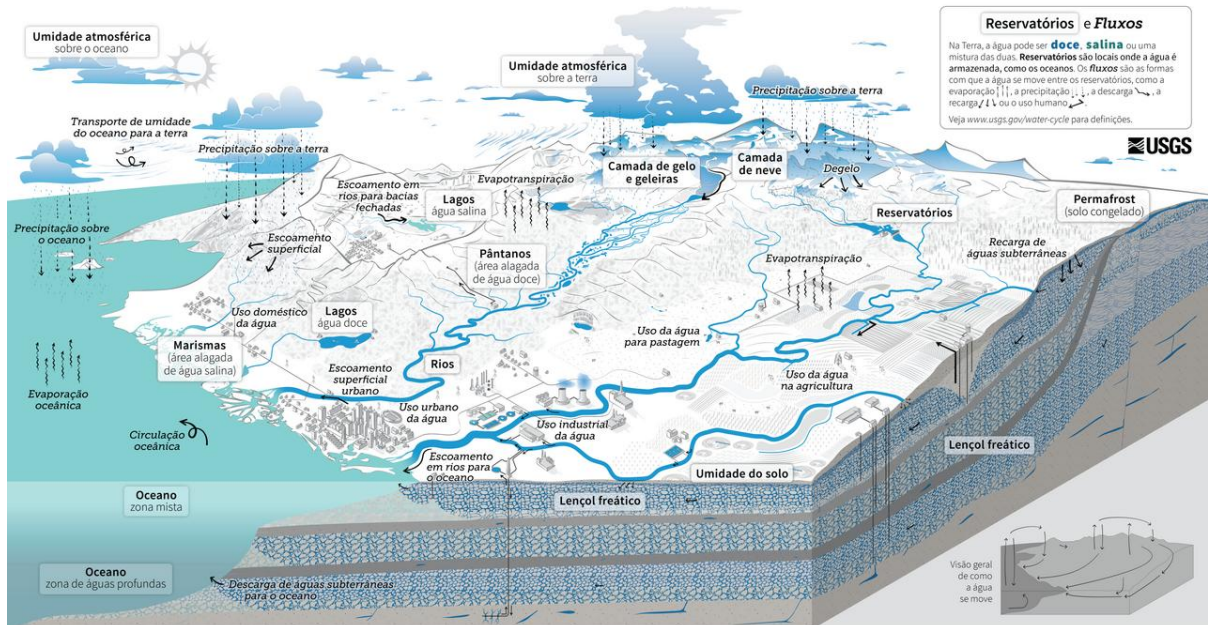
A bacia hidrográfica pode ser então considerada um ente sistêmico. É onde se realizam os balanços de entrada proveniente da chuva e saída de água através do exutório, permitindo que sejam delineadas bacias e sub-bacias, cuja interconexão se dá pelos sistemas hídricos (Porto; Porto, 2008, p. 45).

A gênese da rede de drenagem em uma bacia hidrográfica está diretamente associada aos processos hidrológicos. Horton (1945) demonstrou que um curso d'água se estabelece quando a força do escoamento acumulado supera a resistência do solo à erosão, marcando a transição entre o escoamento difuso e o concentrado. Além disso, observou que cursos de maior ordem tendem a apresentar declividades mais suaves do que aqueles de menor ordem, evidenciando a relação entre a área de drenagem e o gradiente do terreno. Avançando nessa linha de investigação, métodos posteriores propuseram a identificação da área limite de drenagem com base na relação entre declividade e área de contribuição. A premissa central é que o início efetivo da rede ocorre no ponto em que a tendência de redução da declividade deixa de ser observada, indicando a concentração permanente do fluxo (Tarboton, 1989; Bras, 1991; Rodriguez-Iturbe, 1992 apud Fan et al., 2013).

O funcionamento das bacias está intrinsecamente ligado ao ciclo hidrológico, processo contínuo de circulação da água no planeta. De acordo com Miranda, Oliveira e Silva (2010), trata-se de um movimento global, no qual a água percorre diferentes estados físicos e retorna ao seu ponto de origem. A energia solar constitui a principal força motriz desse sistema, impulsionando a evaporação e o transporte de vapor por correntes de ar, enquanto a gravidade atua nos processos de precipitação, infiltração e escoamento (Tundisi, 2003). Como ressaltam Tucci e Bertoni (2003), a compreensão do ciclo da água é essencial, pois a intervenção humana pode alterar seu

funcionamento natural, gerando impactos que exigem avaliação e estratégias de mitigação. A Figura 1 apresenta um exemplo desse ciclo.

Figura 1. O ciclo da água.



Fonte: USGS VizLab. Tradução de Marcio Baldissera Cure (UFSC)

Dessa forma, adotar uma bacia hidrográfica como unidade de planejamento é uma prática consolidada em escala internacional. Segundo Donadio, Galbiatti e Paula (2005), essa escolha se justifica por ser uma unidade física bem definida e funcional, cujos elementos atuam de maneira integrada. Mesmo pequenas parcelas de território fazem parte de uma bacia, o que reforça seu caráter de limite natural para estudos ambientais e gestão territorial.

No Brasil, a gestão ambiental e territorial foi sendo moldada por marcos normativos e institucionais. A Constituição Federal de 1988 estabeleceu o meio ambiente ecologicamente equilibrado como direito de todos e dever do poder público e da sociedade (art. 225), além de atribuir à União a competência para legislar sobre recursos hídricos e definir critérios de outorga de uso (art. 21, XIX). A partir daí, diferentes eventos e legislações reforçaram essa agenda, como a criação da Secretaria Especial do Meio Ambiente em 1973, a Política Nacional do Meio Ambiente em 1981, Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 001/86 que instituiu a obrigatoriedade do Estudo de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto

Ambiental (EIA/RIMA) e a Conferência Rio-92, que consolidou o paradigma do desenvolvimento sustentável (Ross; Del Prette, 2011).

Esses avanços estruturaram a base para a formulação da PNRH, instituída pela Lei nº 9.433/1997. A chamada “Lei das Águas” representou um marco regulatório ao instituir a Política Nacional de Recursos Hídricos e criar o Sistema Nacional de Gerenciamento. Seu art. 1º estabelece princípios fundamentais, como o reconhecimento da água como bem público, recurso limitado e de valor econômico, cujo uso em situações de escassez deve priorizar o consumo humano e a dessedentação animal. Também define que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para a implementação da política e ressalta a necessidade de gestão descentralizada e participativa (Brasil, 1997).

No art. 5º, a lei descreve instrumentos de planejamento, como os planos de recursos hídricos, o enquadramento dos corpos d’água, a outorga, a cobrança pelo uso e o sistema de informações. Esses fundamentos consolidaram a bacia hidrográfica como unidade central de gestão e planejamento no país (Brasil, 1997).

No âmbito estadual, a gestão da BHRP está inserida na Unidade de Gestão de Recursos Hídricos (UGRHI) do Paranapanema, instituída pela Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nº 109/2010. Essa unidade engloba as bacias do rio Paranapanema, do rio Santo Anastácio e de outros tributários diretos do rio Paraná, estabelecendo instâncias colegiadas para o gerenciamento integrado. O CBH-MP reforça que a adoção da bacia hidrográfica como unidade de referência favorece a articulação entre municípios, estados e União, permitindo maior eficiência na formulação e implementação de políticas públicas voltadas ao uso sustentável da água e do território (CBH-MP, 2017).

Essa perspectiva destaca a importância de compreender as bacias não apenas como unidades físicas de drenagem, mas também como espaços de gestão compartilhada. Por fim, como ressalta Piroli (2013), cada bacia apresenta fragilidades naturais determinadas por fatores como relevo, solo, geologia e cobertura vegetal. Quando submetidas a pressões externas, sobretudo de origem antrópica, essas fragilidades tendem a se intensificar, podendo ser diagnosticadas por meio de estudos de vulnerabilidade. Tais análises são fundamentais para orientar políticas de conservação e assegurar o uso sustentável dos recursos naturais, reafirmando o papel estratégico das bacias hidrográficas como unidade de planejamento e gestão ambiental.

3.2 Fragilidade ambiental e geotecnologias aplicadas ao planejamento territorial

O conceito de fragilidade ambiental está associado à capacidade limitada que um ambiente possui de suportar pressões externas sem comprometer sua integridade ecológica. De acordo com Ross (1994; 2012), a fragilidade pode ser entendida como a suscetibilidade natural de uma paisagem a sofrer processos degradacionais quando submetida a tensões externas. O método de avaliação incorpora elementos do meio físico intrínsecos à paisagem, como relevo, solos, geologia e cobertura vegetal, permitindo mensurar a suscetibilidade da estabilidade dos geossistemas.

De forma complementar, Crepani et al. (2001) entendem a fragilidade como vulnerabilidade à erosão, resultado da interação entre processos de morfogênese e pedogênese, os quais se manifestam a partir de fatores como geologia, geomorfologia, pedologia, clima, vegetação e uso da terra. Lira, Francisco e Feiden (2022) ampliam esse debate ao definir e enfatizar que a fragilidade se expressa na suscetibilidade a fenômenos como erosão, assoreamento, movimentos de massa e inundações, evidenciando sua multidimensionalidade.

No âmbito das bacias hidrográficas, a fragilidade ambiental adquire um papel central, uma vez que essas unidades funcionam como sistemas naturais integrados, nos quais as interações entre fatores físicos e antrópicos ocorrem de maneira encadeada. Ross (1994; 2012) contribui para esse debate ao distinguir dois níveis de análise: a fragilidade potencial, definida pelos atributos naturais da paisagem, e a fragilidade emergente, resultante da ação humana, especialmente pela intensificação do uso da terra e pela consequente redução da resiliência dos ecossistemas.

Essa diferenciação ajuda a compreender o grau de resposta do ambiente frente às pressões impostas pelas práticas produtivas e pelas alterações na cobertura vegetal. A avaliação da fragilidade ambiental demanda, portanto, uma compreensão aprofundada das características morfológicas, estruturais e funcionais das unidades de paisagem. Crepani et al. (2001) destacam que a interpretação adequada desses elementos exige o estudo da origem, composição, forma e estágio de evolução das unidades geomorfológicas, pois esses aspectos influenciam diretamente a capacidade do território em suportar intervenções. Condições climáticas e a cobertura vegetal também desempenham papel fundamental, uma vez que modulam o impacto das chuvas sobre o solo e afetam a dinâmica dos processos erosivos.

Ao avançar na discussão dos fatores que influenciam a fragilidade ambiental, torna-se evidente a relevância das atividades humanas como vetores de transformação da paisagem. Ab'Saber e Muller-Plantenberg (2002) indicam que práticas agrícolas intensivas podem provocar modificações profundas e, muitas vezes, irreversíveis no ambiente, especialmente em regiões onde a exploração se dá de forma contínua e sem manejo adequado. A intensificação da agricultura, a expansão da pecuária e outros usos produtivos ampliam a exposição do solo, aumentando sua suscetibilidade à erosão e alterando a estrutura ecológica das bacias. Tais impactos, quando não acompanhados de políticas de conservação, aceleram a degradação ambiental.

Os efeitos da ocupação humana se manifestam também na dinâmica hidrossedimentar dos cursos d'água. Conforme argumentam Ribeiro et al. (2015), a falta de planejamento territorial e o manejo inadequado da terra resultam em maior produção, transporte e deposição de sedimentos, contribuindo para o assoreamento dos rios. Esse processo compromete não apenas a qualidade da água, mas também a capacidade de drenagem das bacias, favorecendo inundações e intensificando a perda de solo nas margens fluviais.

A partir dessas reflexões, compreende-se que atividades como agricultura, pecuária, silvicultura, mineração e obras de engenharia, independentemente de sua magnitude, introduzem pressões externas sobre as unidades de paisagem. A resposta a esses estímulos varia de acordo com a resiliência intrínseca de cada ambiente, mas, em muitos casos, resulta em degradação acelerada. A fragilidade, portanto, relaciona-se diretamente à capacidade da paisagem em absorver ou resistir às transformações impostas pela ação antrópica.

Nesse cenário de pressões múltiplas, os estudos de fragilidade ambiental assumem papel estratégico ao fornecer diagnósticos espaciais capazes de orientar políticas públicas de ordenamento territorial e conservação. Morales e Valente (2025) enfatizam que análises integradas, que consideram simultaneamente fatores físicos e antrópicos, são indispensáveis para compreender a complexidade das interações que moldam o espaço geográfico, especialmente no que se refere à preservação dos recursos hídricos. Nesse contexto, as geotecnologias assumem papel estratégico como ferramentas de diagnóstico e monitoramento ambiental. Elas englobam um conjunto de técnicas computacionais para o tratamento e análise de informações geográficas, com aplicações em comunicação, gestão de recursos e planejamento

espacial. Como ressaltam Câmara e Medeiros (1998), em áreas de grande extensão territorial, particularmente em regiões agrícolas intensivas, o geoprocessamento se mostra fundamental para apoiar a tomada de decisões ambientais, especialmente por aliar baixo custo e capacidade de gerar conhecimento local detalhado.

Entre as geotecnologias, destaca-se o sensoriamento remoto, definido como:

A utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados coletados a bordo das aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície da Terra a partir de registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que a compõem em suas mais diversas manifestações (Novo, 2010, p. 28).

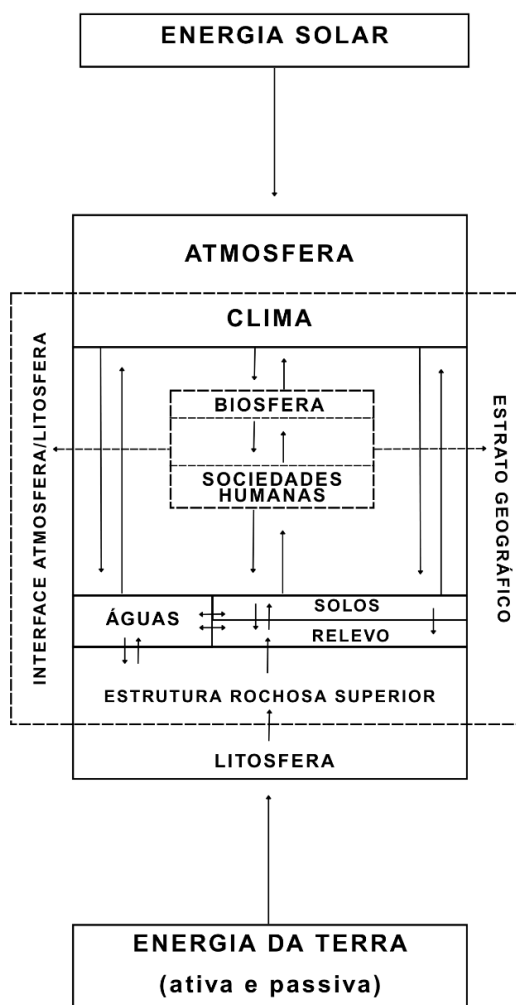
Associado ao sensoriamento remoto, o geoprocessamento constitui um campo amplo que envolve diferentes métodos de manipulação e análise de dados espaciais. Fitz (2008) aponta que os SIG representam o núcleo dessas tecnologias, permitindo organizar, integrar e analisar informações georreferenciadas sobre fenômenos ambientais. Nesse sentido, o georreferenciamento é essencial, pois garante que os dados sejam associados a sistemas de coordenadas terrestres, viabilizando a integração de diferentes mapas e fontes de informação (Lima, 2016).

Nessa perspectiva, as geotecnologias têm desempenhado um papel cada vez mais relevante ao ampliar a precisão das análises e permitir a integração de dados de diversas naturezas. SIG, Sensoriamento Remoto e modelagens espaciais permitem criar representações georreferenciadas de múltiplos fatores ambientais, tais como declividade, solo, uso e cobertura da terra, precipitação e litologia, possibilitando análises espacialmente explícitas do nível de fragilidade da paisagem (Lira; Francisco; Feiden, 2022).

Um produto do uso dessas geotecnologias é o atlas cartográfico. Segundo Nogueira (2006), o termo “atlas” tem origem na mitologia grega, remetendo ao titã que sustentava o mundo, posteriormente apropriado por Mercator em 1595 para designar uma coletânea sistemática de mapas. Desde então, o atlas consolidou-se como uma ferramenta de síntese, reunindo representações cartográficas em formatos padronizados que facilitam tanto a análise científica quanto a difusão de informações para públicos mais amplos. Os mapas, enquanto representações de aspectos físicos e socioambientais em diferentes escalas, quando organizados em coleções, permitem estruturar leituras abrangentes sobre o território.

Assim, a integração entre os estudos de fragilidade ambiental e o uso das geotecnologias materializa-se na elaboração de produtos cartográficos, como os mapas de fragilidade, que permitem articular variáveis geomorfológicas, pedológicas, climáticas e de uso e cobertura da terra. Conforme destaca Ross (1994), essa abordagem sistêmica possibilita compreender tanto as vulnerabilidades quanto as potencialidades da paisagem. A Figura 2 ilustra o fluxo de energia dos processos dinâmicos da Terra. Ao transpor essa lógica para os produtos cartográficos, como os mapas de fragilidade ambiental, busca-se representar tais interações de maneira integrada, fornecendo subsídios técnicos para pesquisas científicas e, sobretudo, para o planejamento territorial.

Figura 2. Fluxo da relação sociedade/natureza.



Fonte: Ross (1994)

3.3 Análise multicritério como suporte à tomada de decisão

A capacidade dos SIGs de integrar dados provenientes de diferentes fontes, como o Modelo Digital de Elevação (MDE) e cartas temáticas, resulta na construção de camadas analíticas que representam fisicamente os condicionantes naturais e antrópicos de uma bacia hidrográfica, aprimorando a inteligência geográfica disponível aos gestores ambientais (Morales; Valente, 2025).

O avanço dessas tecnologias tem impulsionado significativamente o uso da AMC na avaliação da fragilidade ambiental, uma vez que a degradação não decorre de um fator isolado, mas do efeito combinado entre múltiplos condicionantes. França et al. (2022) destacam que a integração entre SIG e AMC constitui uma ferramenta essencial para a tomada de decisões complexas, especialmente em cenários onde há conflitos entre conservação e uso econômico da terra. Essa integração permite que os critérios sejam avaliados simultaneamente e ponderados segundo sua importância relativa, resultando em modelos robustos capazes de orientar o planejamento ambiental.

A AMC constitui-se em uma ferramenta metodológica que organiza problemas complexos em variáveis comparáveis, contribuindo para decisões mais fundamentadas e transparentes. Essa abordagem busca apoiar a escolha entre diferentes alternativas ou cenários por meio da consideração simultânea de múltiplos critérios. Para isso, combina dimensões quantitativas, de caráter objetivo, com aspectos qualitativos, de natureza subjetiva, estruturando um conjunto de atributos que subsidia escolhas mais equilibradas (Padilha; Trevisan; Cruz, 2014).

Nos processos de tomada de decisão baseados em AMC, as alternativas são classificadas e selecionadas de acordo com critérios previamente estabelecidos. Tais critérios representam as variáveis mais relevantes ao problema e, em geral, assumem homogeneidade no espaço analisado, implicando que tanto os pesos atribuídos quanto as funções de valor sejam considerados uniformes em toda a área de estudo (Malczewski, 2011). Assim, a AMC parte da premissa de que uma decisão consistente deve considerar não apenas a importância relativa de cada critério, mas também o equilíbrio entre eles.

No âmbito das metodologias multicritério destaca-se o Processo Hierárquico Analítico (AHP), desenvolvido por Thomas Saaty na década de 1970 e amplamente adotado em estudos ambientais devido à sua aplicabilidade, flexibilidade e

confiabilidade científica. O método consiste em estruturar o problema em níveis hierárquicos, permitindo comparar criteriosamente os fatores, por meio de uma matriz de julgamentos pareados, com base em uma escala de 1 a 9 que reflete a importância relativa entre eles (Uttam; Bhagirath Behera, 2024).

Essa estruturação hierárquica e sistemática é uma de suas principais vantagens, pois transforma avaliações empíricas em valores numéricos ponderados, possibilitando que diferentes especialistas contribuam com suas percepções técnicas para definir a fragilidade relativa de cada fator ambiental (Madal; Prakash; Mondal, 2025). Tal característica é particularmente valiosa em análises onde parte dos dados possui um componente subjetivo, como ocorre em avaliações da influência de práticas antrópicas ou do grau de proteção conferido pela cobertura vegetal (França et al., 2022).

Embora o AHP seja reconhecido como um método que incorpora a subjetividade inerente ao julgamento humano, uma de suas principais vantagens reside na capacidade de justificar as escolhas de forma lógica e matematicamente estruturada. Como apontam Santos e Cruz (2013), o método não apenas permite atribuir pesos proporcionais aos critérios, mas também avalia a coerência interna desses julgamentos por meio do cálculo do índice de consistência.

Nesse sentido, o AHP adota como etapa essencial a verificação da Razão de Consistência (RC), que deve ser inferior a 0,10 para garantir que os julgamentos realizados são coerentes do ponto de vista matemático, evitando vieses interpretativos que possam comprometer os resultados (Madal; Prakash; Mondal, 2025)). Essa validação estatística confere ao método um diferencial de confiabilidade quando comparado a abordagens puramente qualitativas. Ainda assim, reconhece-se que o julgamento humano é passível de subjetividade, sendo esta uma das principais limitações do AHP (França et al., 2022; Madal; Prakash; Mondal, 2025)).

Apesar deste desafio inerente, o AHP tem sido amplamente reconhecido como eficaz na modelagem de fragilidade ambiental, sobretudo porque incorpora simultaneamente aspectos físicos e antrópicos, permitindo diferenciar áreas onde a vulnerabilidade decorre de condicionantes naturais daquelas em que resulta da degradação induzida pelo uso da terra (França et al., 2022). Tal vantagem ganha ainda mais relevância quando analisada sob o enfoque da distinção entre fragilidade potencial e fragilidade emergente (Uttam Das; Bhagirath Behera, 2024).

Com o suporte do AHP, os SIGs têm possibilitado análises integradas mais consistentes sobre áreas suscetíveis a processos erosivos, revelando padrões espaciais que auxiliam tanto na compreensão dos processos quanto na definição de diretrizes para o ordenamento territorial (Pautz et al., 2023). Além disso, a aplicação do AHP é reconhecida como uma solução de baixo custo, flexível e replicável, podendo ser adaptada às necessidades dos gestores mediante ajustes nas matrizes de ponderação, conforme sugerido por Anjinho et al. (2021).

Nesse sentido, França et al. (2022) observam que os modelos de fragilidade ambiental apoiados em AHP constituem instrumentos de inteligência territorial, pois subsidiam políticas públicas voltadas à proteção de áreas críticas, recuperação ambiental e prevenção de riscos, especialmente em regiões onde as pressões antrópicas ameaçam diretamente os recursos hídricos.

Portanto, a integração entre AHP e SIG tem promovido avanços significativos na análise da fragilidade ambiental em bacias hidrográficas, consolidando-se como ferramenta reconhecida e amplamente validada pela literatura para apoio ao planejamento territorial, à conservação dos ecossistemas fluviais e ao manejo sustentável dos recursos naturais (Pautz et al., 2023).

No campo das análises ambientais, os resultados derivados do AHP costumam ser integrados em ambiente SIG, especialmente por meio da álgebra de mapas. Conforme destaca Miranda (2010), essa técnica envolve operações matemáticas sobre diferentes camadas espaciais, que podem incluir multiplicações por constantes, transformações funcionais e, principalmente, operações aritméticas (soma, subtração, multiplicação e divisão) entre mapas. Neste trabalho, adotou-se a técnica de Combinação Linear Ponderada (CLP), baseada na soma ponderada de mapas.

A CLP apresenta ampla aplicação devido à sua simplicidade e à capacidade de integrar múltiplos fatores em um índice sintético. Segundo Malczewski (2004), essa técnica possibilita a compensação entre critérios, permitindo que o baixo desempenho de uma variável seja equilibrado por valores elevados em outra, respeitados os pesos definidos. No SIG, sua operacionalização ocorre por meio da sobreposição de mapas padronizados, resultando em um produto final que expressa a contribuição relativa de cada critério para o objetivo da análise.

Portanto, a integração entre AHP e CLP configura um avanço metodológico relevante na avaliação da fragilidade ambiental. Enquanto o AHP assegura a atribuição consistente e justificada dos pesos, a CLP possibilita a espacialização

desses resultados em modelos cartográficos, oferecendo uma leitura sistêmica e aplicada à suscetibilidade do território.

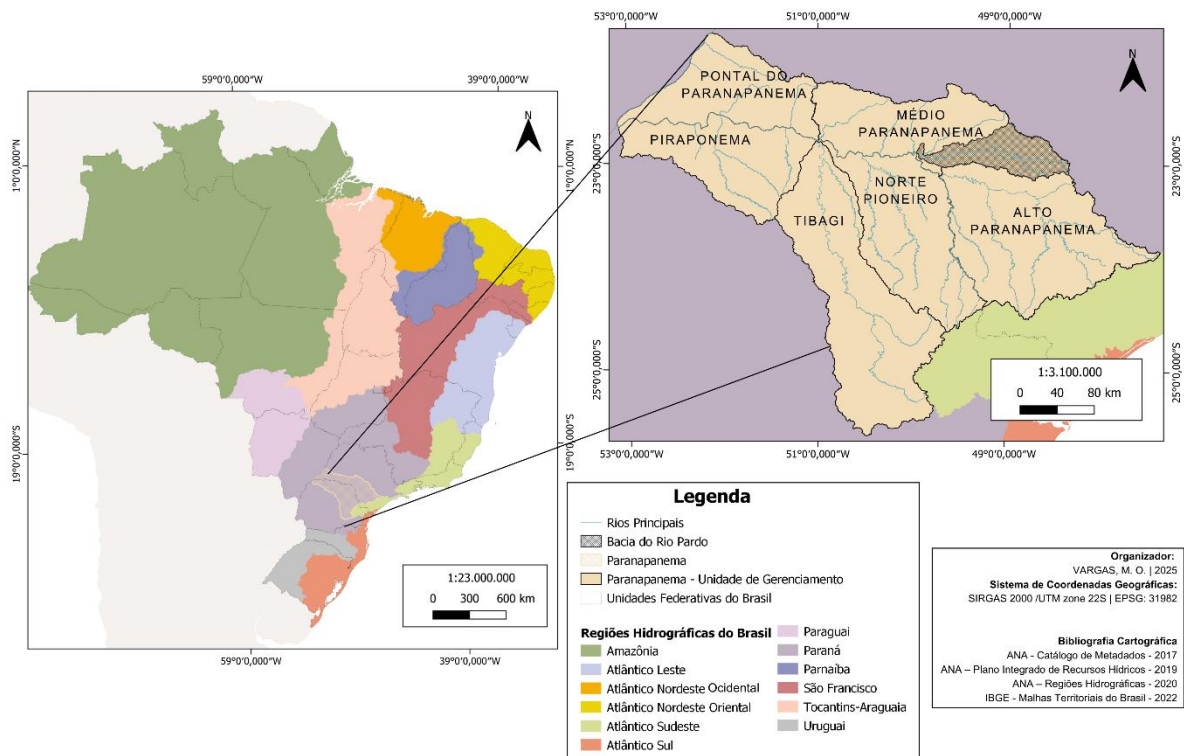
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Contextualização da área de estudo

O mapeamento das áreas de fragilidade ambiental foi realizado na BHRP, que se localiza na porção centro-sudoeste do estado de São Paulo (Figura 3). A bacia está inserida no sistema hidrográfico do Rio Paranapanema, pertencente à Região Hidrográfica do Paraná, uma das doze regiões definidas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) para fins de planejamento e gestão integrada dos recursos hídricos no Brasil.

No contexto do sistema estadual de gestão de recursos hídricos de São Paulo, a área de estudo corresponde à Unidade de Planejamento Hídrico (UPH) - Rio Pardo, estando subordinada à UGRHI-17 – Médio Paranapanema. Esta unidade constitui um recorte estratégico para o ordenamento territorial e ambiental, abrigando os principais afluentes do Rio Paranapanema e sub-bacias de importância regional para o abastecimento, a conservação e a produção agropecuária.

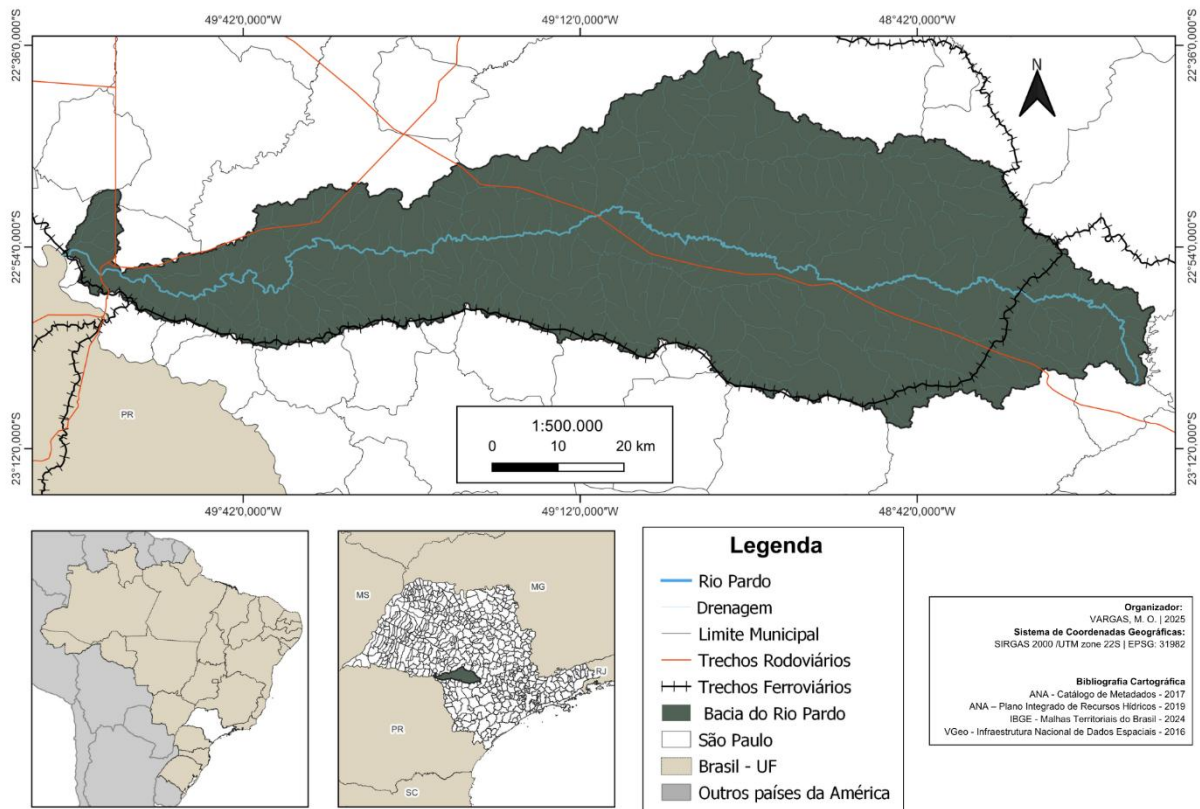
Figura 3. Localização da BHRP no contexto da Região Hidrográfica do Paraná e da UGRHI-17.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

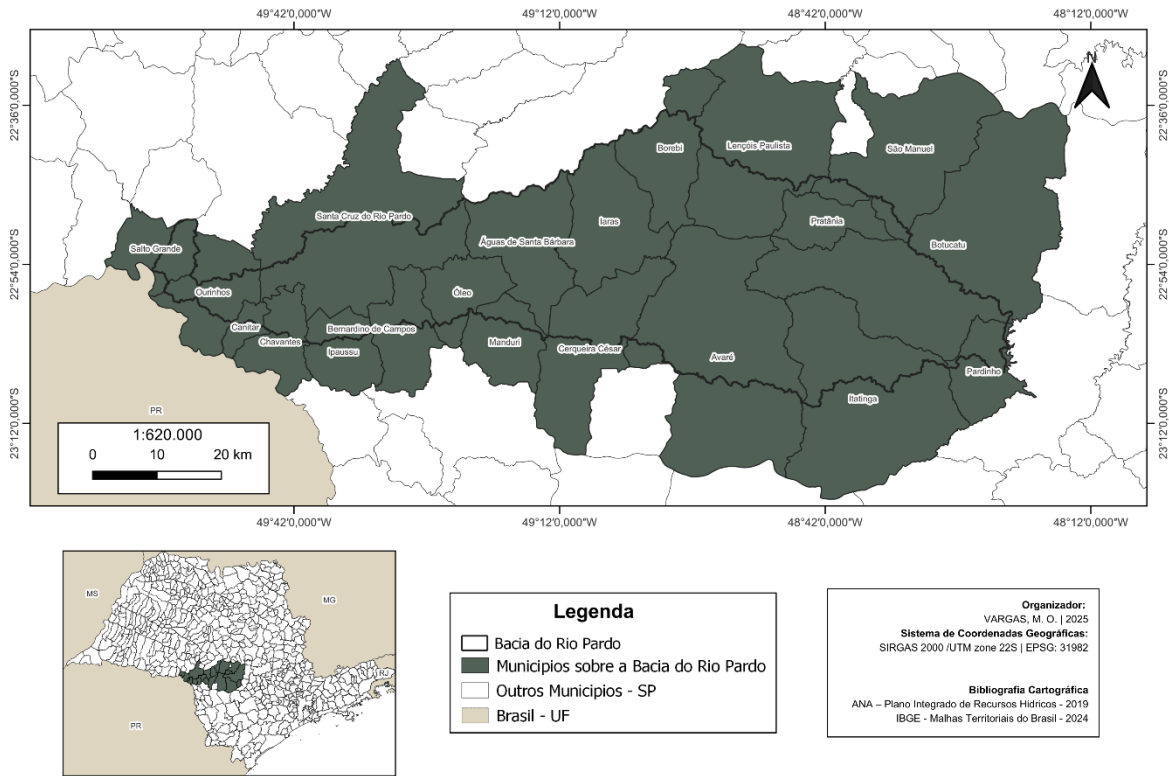
De acordo com Piroli (2013), a área de drenagem da bacia correspondia a 4.803,12 km². Entretanto, após a reestruturação em ambiente SIG, identificou-se uma atualização da área total para 4.808,99 km² (Figura 4). A bacia abrange 20 municípios paulistas: Pardinho, Botucatu, São Manuel, Pratânia, Lençóis Paulista, Borebi, Itatinga, Avaré, Cerqueira César, Iaras, Águas de Santa Bárbara, Manduri, Óleo, Bernardino de Campos, Santa Cruz do Rio Pardo, Ipaussu, Chavantes, Canitar, Ourinhos e Salto Grande (Figura 5). O Rio Pardo apresenta aproximadamente 264,25 km de extensão, com nascente em Pardinho e foz em Salto Grande.

Figura 4. Mapa de localização da BHRP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 5. Mapa de localização dos municípios com território na BHRP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Em relação à dimensão populacional, observa-se forte heterogeneidade entre os municípios integrantes da bacia. Conforme os dados do Censo Demográfico do IBGE (2022), alguns municípios como Botucatu, Ourinhos e Avaré concentram os maiores contingentes de habitantes, enquanto municípios como Óleo e Borebi apresentam menor ocupação.

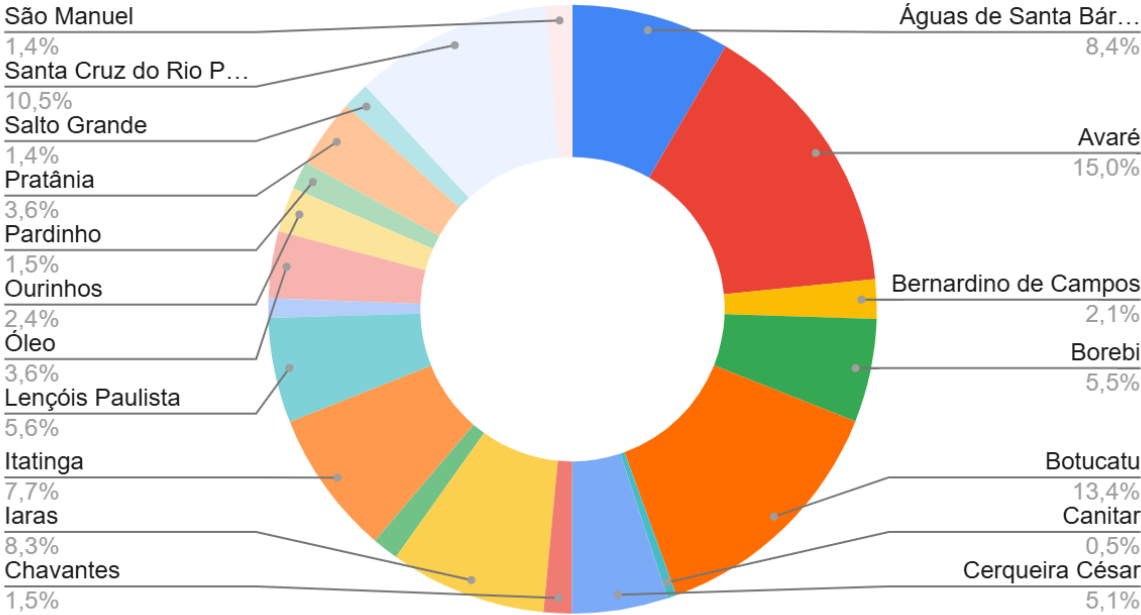
Para compreender a relação espacial entre a bacia hidrográfica e os municípios que a compõem, apresenta-se a seguir um conjunto de informações quantitativas. Os dados incluem a proporção da área da bacia em cada município, sua representatividade em termos territoriais e a distribuição espacial da unidade hidrográfica. Embora não seja possível estabelecer a correlação exata entre a população residente e a área da bacia, uma vez que parte das sedes municipais se localiza fora dos limites hidrográficos (Figura 6), os elementos na Tabela 1, Gráfico 1 e Figura 7 permitem visualizar a importância relativa de cada município na configuração territorial da bacia.

Tabela 1. Área dos municípios e suas respectivas participações na BHRP.

Município	População	Área do município (km²)	Área da bacia dentro do município	% da bacia inserida no município
Águas de Santa Bárbara	7.177	404,46	403,74	99,82%
Avaré	92.805	1.213,06	722,82	59,59%
Bernardino de Campos	11.607	244,16	100,27	41,07%
Borebi	2.713	347,99	264,56	76,03%
Botucatu	145.155	1.482,64	646,13	43,58%
Canitar	6.283	57,46	22,89	39,84%
Cerqueira César	21.469	511,62	245,88	48,06%
Chavantes	12.211	188,73	71,31	37,78%
Iaras	8.010	401,38	401,07	99,92%
Ipaussu	13.712	209,55	66,69	31,82%
Itatinga	19.070	979,82	370,79	37,84%
Lençóis Paulista	66.505	809,54	268,37	33,15%
Manduri	9.871	229,05	49,52	21,62%
Óleo	2.512	198,94	171,11	86,01%
Ourinhos	103.970	295,82	114,38	38,67%
Pardinho	7.153	209,89	72,31	34,45%
Pratânia	5.126	175,10	175,10	100,00%
Salto Grande	9.050	188,44	68,82	36,52%
Santa Cruz do Rio Pardo	46.442	1.114,75	504,52	45,26%
São Manuel	37.289	650,73	68,71	10,56%
Total	628.130	9.913,13	4.808,99	-

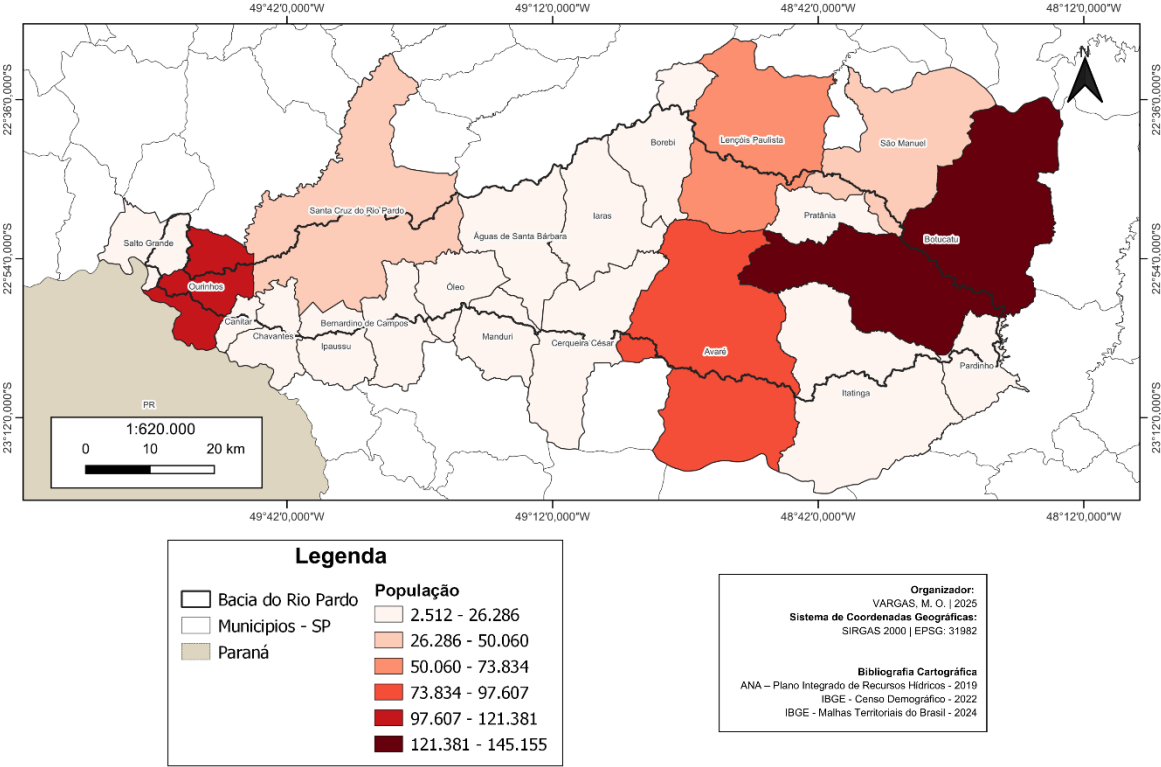
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Gráfico 1. Percentual da bacia hidrográfica em cada município.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

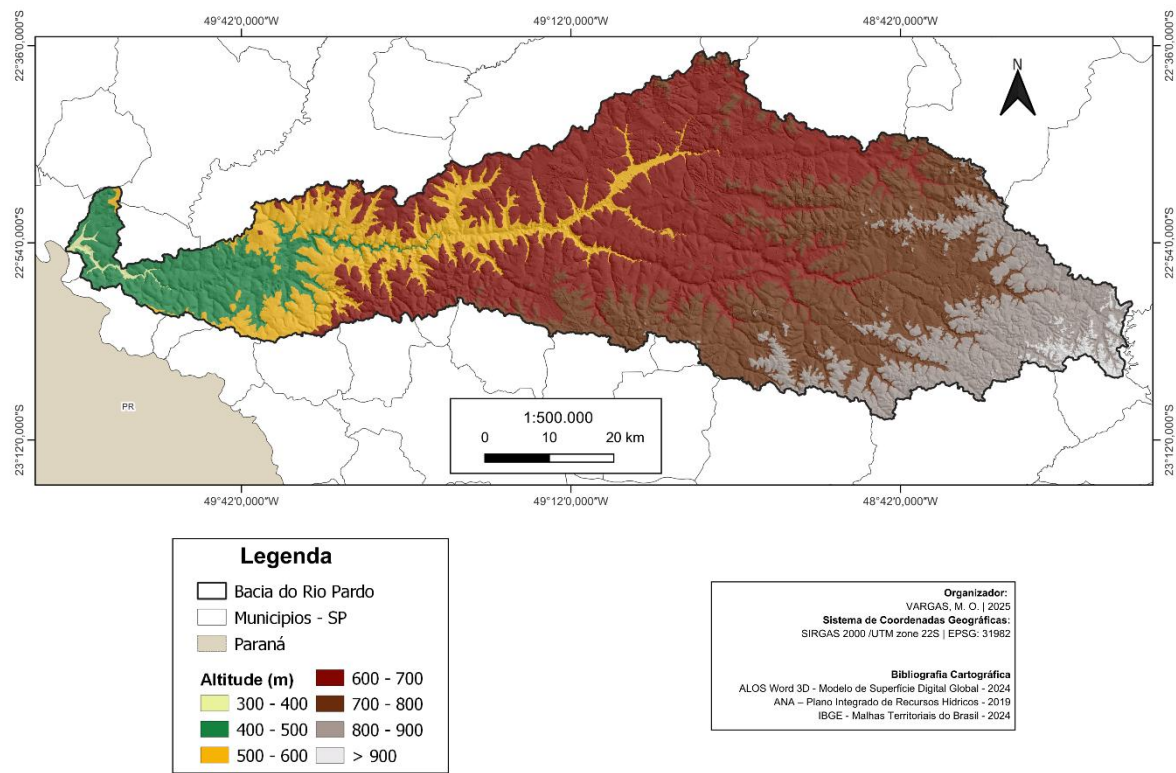
Figura 7. Mapa populacional da BHRP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

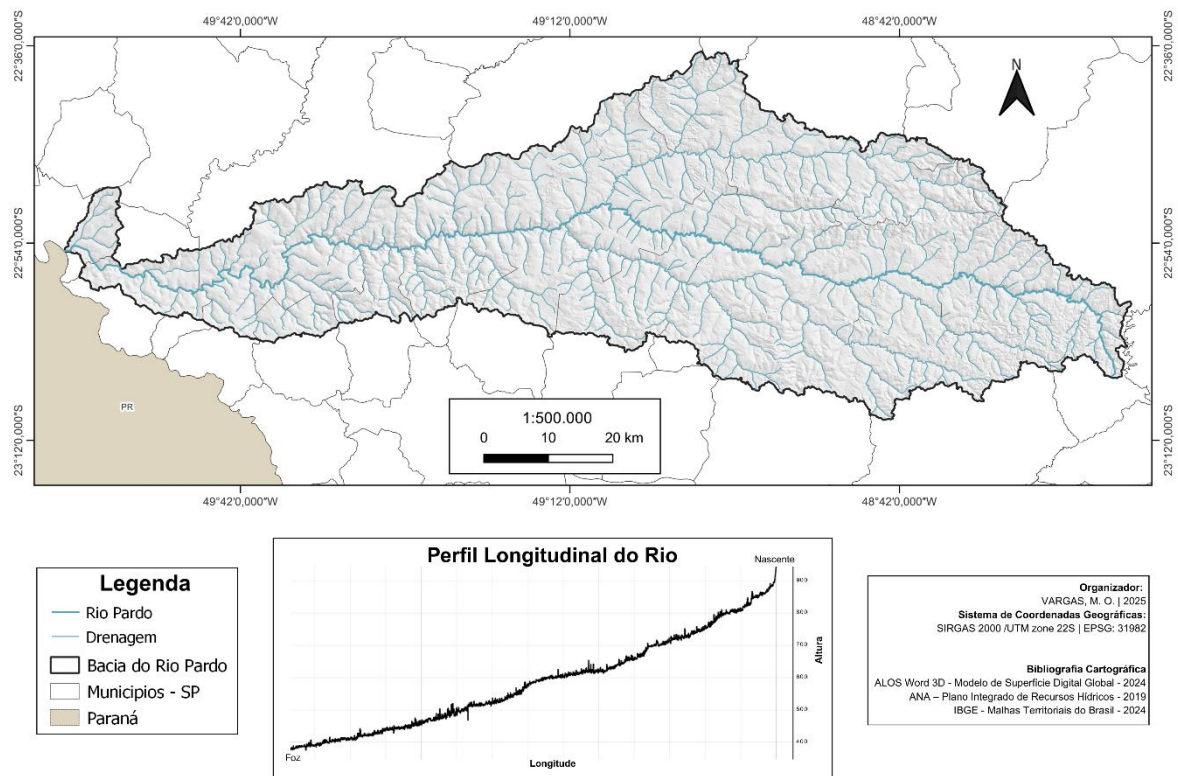
Do ponto de vista físico, a bacia apresenta uma altitude mínima de 341,27 m em sua foz e máxima de 993,56 m na região de cabeceiras, refletindo um gradiente altimétrico importante para a dinâmica hidrográfica (Figura 8). O perfil longitudinal do rio evidencia o declive da nascente até a planície de exutório, caracterizando setores com maior energia fluvial e suscetibilidade a processos erosivos (Figura 9).

Figura 8. Mapa hipsométrico da BHRP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 9. Perfil longitudinal do Rio Pardo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Do ponto de vista geomorfológico, segundo Ross e Moroz (1996), a área de estudo está inserida na Unidade Morfoestrutural da Bacia Sedimentar do Paraná e na Unidade Morfoescultural do Planalto Ocidental Paulista. A região engloba duas unidades geomorfológicas: o Planalto Centro-Occidental e o Planalto Residual de Botucatu.

A vegetação nativa predominante é a Floresta Estacional Semidecidual, marcada pela dupla estacionalidade climática: verões chuvosos e invernos secos. Foram ainda identificados remanescentes de Cerrado, sobretudo em áreas centrais da bacia (Kronka, 2005).

4.2 Materiais

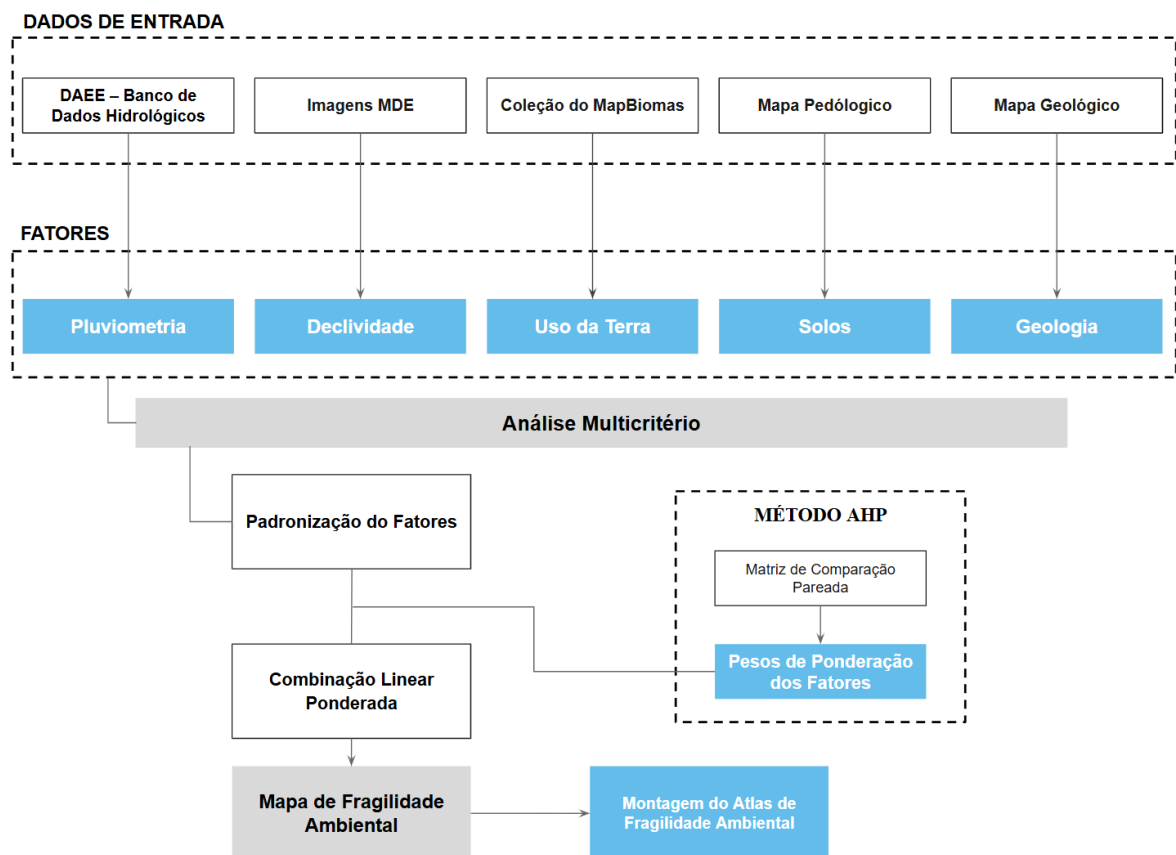
4.2.1 Roteiro metodológico

O processo metodológico foi organizado de forma sistematizada, fundamentado no uso de técnicas de SIG associadas à AMC para o mapeamento da

fragilidade ambiental da BHRP. As etapas contemplaram a coleta, organização e padronização das bases geoespaciais; a seleção e ponderação dos fatores condicionantes por meio do método AHP; a integração dos dados via CLP em ambiente SIG; e, por fim, a geração do mapa de fragilidade ambiental e a elaboração do atlas digital da bacia.

A sequência metodológica está apresentada no fluxograma da Figura 10, evidenciando o encadeamento das atividades e a obtenção dos produtos cartográficos destinados ao apoio ao planejamento e à gestão territorial.

Figura 10. Fluxograma metodológico: modelo de mapeamento da fragilidade ambiental.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2.2 Elaboração da base de dados

A base de dados geoespacial utilizada neste estudo foi construída a partir de fontes oficiais nacionais e internacionais, assegurando a consistência cartográfica e a confiabilidade das informações. As bases foram selecionadas em função da sua

pertinência ao objeto de estudo e de sua relevância para representar os fatores condicionantes da fragilidade ambiental da BHRP.

Para a delimitação da área de estudo e caracterização hidrográfica, foram utilizadas diferentes bases disponibilizadas pela ANA. O Plano Integrado de Recursos Hídricos do Paranapanema (2019), disponível no Catálogo de Metadados da ANA, serviu como referência para a organização da área de drenagem da bacia, bem como suas unidades de planejamento e gestão, sendo empregado na delimitação da área da UGRHI-17. Complementarmente, a base de Regiões Hidrográficas (2020) forneceu o recorte territorial da Região Hidrográfica do Paraná, permitindo enquadrar a BHRP no contexto nacional de gestão hídrica.

As divisões político-administrativas foram obtidas no IBGE (2024), que disponibiliza as malhas territoriais do Brasil em escala compatível com 1:250.000. Essas informações foram fundamentais para identificar as unidades federativas e os 20 municípios inseridos parcial ou totalmente na bacia, permitindo integrar os limites municipais ao contexto hidrográfico.

Além disso, foram utilizadas imagens de satélite de alta resolução do sensor WPM/CBERS-04A, disponibilizadas pelo Catálogo de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com a finalidade de compor o atlas digital e apoiar as análises do estudo. O sensor possui resolução de 2 m (pancromática) e 8 m (multiespectral), permitindo detalhamento visual e espacial complementar aos demais insumos (Tabela 2). As imagens de satélite utilizadas foram adquiridas em diferentes datas e órbitas. Em 9 de junho de 2024, foram obtidas as cenas correspondentes às órbitas 206 pontos 141 e 142. Posteriormente, em 5 de agosto de 2024, foi utilizada a cena da órbita 207 ponto 142. Complementarmente, em 15 de agosto de 2024, foram incorporadas as cenas referentes às órbitas 205 pontos 141 e 142.

Tabela 2. Características das bandas dos sensores WPM - CBERS 04A.

Característica	Informação
Bandas Espectrais	B0 - Banda pancromática: 0,45 - 0,90 µm
	B1 - Banda Azul: 0,45 - 0,52 µm
	B2 - Banda Verde: 0,52 - 0,59 µm
	B3 - Banda Vermelho: 0,63 - 0,69 µm
	B4 - Banda infravermelho próximo: 0,77 - 0,89 µm
Resolução Espacial	2 m (pancromática)
	8 m (multiespectral)
Resolução temporal	31 dias
Largura da Faixa Imageada	92 km
Resolução Radiométrica	10 bits

Fonte: INPE | Câmeras Imageadoras (2024). Adaptado pelo autor (2025).

No que se refere à variável precipitação, foram utilizados dados Banco de Dados Hidrológicos do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), provenientes de estações pluviométricas distribuídas nos municípios inseridos na BHRP. As séries históricas consideradas (2000–2022) contemplam valores de precipitação média mensal, permitindo caracterizar o regime pluviométrico da bacia e compreender a dinâmica sazonal das chuvas, informação necessária para subsidiar as análises ambientais desenvolvidas nas etapas subsequentes da metodologia.

A variável declividade e a hipsometria foram derivadas do Modelo Digital de Elevação ALOS World 3D – 30m (Japan Aerospace Exploration Agency [JAXA], 2014) obtido via plugin *OpenTopography DEM Downloader* na ferramenta QGIS. Esse produto, com resolução de 30 metros, é resultante de cenas captadas pelo sensor Panchromatic Remote-Sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM) do satélite Advanced Land Observing Satellite (ALOS), sendo amplamente utilizado em estudos ambientais e de modelagem espacial.

Os dados de uso e cobertura da terra foram extraídos da Coleção 9.0 (2023) do MapBiomas, baseada em imagens do satélite Landsat (resolução espacial de 30 m), processadas na plataforma Google Earth Engine. A metodologia combina algoritmos de aprendizado de máquina (*Random Forest*) com filtros espaciais e temporais, garantindo consistência e detalhamento dos mapas anuais, que

representam as principais classes de uso (floresta, agricultura, pastagem, áreas urbanas e corpos hídricos).

As informações de solos foram obtidas no Mapa Pedológico do Estado de São Paulo (Rossi, 2017), que integra levantamentos pedológicos detalhados e reinterpretados a partir de dados geológicos, geomorfológicos e de fotointerpretação, harmonizados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS).

Por fim, a geologia da área foi caracterizada a partir do Mapa Geológico do Estado de São Paulo (Perrotta et al., 2006), na escala 1:750.000, elaborado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Este documento permitiu identificar as principais formações rochosas da região e sua relação com processos geomorfológicos e de recarga hídrica. Na Tabela 3 apresenta-se a síntese dos dados cartográficos utilizados, incluindo o tipo de informação, sua finalidade na elaboração dos mapas e as respectivas fontes de acesso.

Tabela 3. Atributos ambientais utilizados para as análises realizadas.

Tipo de dado	Finalidade / Elaboração de mapa	Fonte / Dados	Acesso
Base cartográfica da bacia	Todos os mapas (delimitação da bacia e drenagem)	ANA – Plano Integrado de Recursos Hídricos (2019)	Link
Limites político-administrativos	Todos os mapas (UFs e municípios)	IBGE – Malhas Territoriais do Brasil (2024)	Link
Imagem de satélite (CBERS-04A)	Localização e detalhamento dos municípios	INPE – Catálogo de Imagens (2024)	Link
Precipitação pluviométrica	Isoietas mapas e fatores pluviométricos	DAEE – Banco de Dados Hidrológicos	Link
Modelo Digital de Elevação (MDE)	Declividade, hipsometria e perfis longitudinais	ALOS World 3D (JAXA, 2014) – via QGIS / OpenTopography	–
Uso e ocupação da terra	Mapas de cobertura, fatores de uso da terra	MapBiomass – Coleção 9.0 (2023)	Link
Classes de solos	Mapas pedológicos e fatores de solos	Governo do Estado de SP – Mapa Pedológico (2017)	Link
Unidades litoestratigráficas	Geologia regional e fatores geológicos	CPRM – Mapa Geológico do Estado de SP (2006)	Link

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2.3 Aplicativos computacionais

A base de dados geoespaciais utilizada neste estudo foi organizada em um disco rígido, garantindo maior controle sobre as informações durante as etapas de pré-processamento e análise. O tratamento dos dados envolveu procedimentos de geoprocessamento realizados no software QGIS (versão 3.28.11), no qual foram efetuadas operações de padronização para o mesmo sistema de referência cartográfica, recorte para o limite da área de estudo, reclassificação temática e ponderação dos fatores. O QGIS, por se tratar de uma plataforma de código aberto amplamente consolidada, permitiu a manipulação eficiente de grandes volumes de dados espaciais e a execução de operações complexas de álgebra de mapas.

A etapa referente à elaboração da matriz de comparação pareada e ao cálculo da validação dos pesos do método AHP foi conduzida no aplicativo Planilhas Google, acessado por meio da conta institucional da UNESP. O uso dessa ferramenta possibilitou a construção colaborativa da matriz, facilitando ajustes e revisões com a participação de especialistas, além de assegurar maior rastreabilidade dos cálculos de consistência.

Para a elaboração do atlas de fragilidade ambiental foram utilizados diferentes aplicativos voltados à organização, visualização e disseminação dos resultados. O atlas foi estruturado em uma página da web desenvolvida no Google Sites, possibilitando acesso facilitado e navegação interativa pelo conteúdo. Além disso, foi criado um aplicativo no Google Earth Engine, permitindo a exploração dinâmica das camadas temáticas geradas. O material cartográfico e os elementos gráficos apresentados no site foram diagramados previamente no Canva, garantindo padronização visual e qualidade na apresentação das informações. Todos os aplicativos foram utilizados por meio da conta institucional da UNESP, assegurando o gerenciamento e a preservação do produto digital.

O processamento dos dados foi realizado em um computador equipado com processador Intel Core i7 (11ª geração), 8 GB de memória RAM, placa de vídeo Intel Iris Xe e sistema operacional Windows 11. Essa configuração assegurou o processamento adequado dos PI, permitindo a manipulação de dados com grande volume e complexidade sem prejuízo de desempenho.

4.3 Metodologia de análise

4.3.1 Etapa de tratamento, recorte e integração dos dados

A AMC constitui em uma ferramenta matemática utilizada para apoiar decisões que envolvem múltiplos fatores, muitas vezes conflitantes. Essa técnica possibilita hierarquizar, comparar e combinar alternativas de forma estruturada (Malczewski, 2011).

Nesse sentido, foi conduzido por meio da aplicação da AMC, com a elaboração de mapas temáticos que integraram as variáveis de pluviometria, declividade, uso e cobertura da terra, pedologia e geologia. Essa abordagem metodológica baseia-se nos referenciais de Ross (1994; 2012) e Crepani et al. (2001), que compreendem a paisagem como um sistema integrado, no qual fatores físicos, bióticos e antrópicos interagem dinamicamente. Sob essa perspectiva, a estabilidade de um ambiente depende do equilíbrio entre tais componentes, sendo que alterações em um deles podem repercutir nos demais e comprometer a resiliência ecológica.

Para o geoprocessamento, os dados foram inicialmente obtidos em formatos vetorial e raster e, em seguida, padronizados para o sistema de referência espacial de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) 2000 / Universal Transverse Mercator (UTM) Zona 22S (EPSG: 31982). Essa etapa assegurou a compatibilidade entre diferentes bases cartográficas, permitindo tanto a integração espacial quanto a realização de cálculos de área em quilômetros quadrados (km²). Posteriormente, todas as bases foram recortadas nos limites políticos dos municípios da BHRP, garantindo que as análises permanecessem restritas à área de interesse.

4.3.2 Padronização dos fatores

Após o tratamento inicial e o recorte dos PI, foi feita a padronização dos fatores ambientais. Essa etapa consistiu na criação de camadas temáticas que representaram os principais condicionantes da fragilidade ambiental, abrangendo fatores físicos (declividade, solos e geologia), bióticos, antrópicos (uso e cobertura da terra) e climáticos (pluviometria).

Cada variável foi hierarquizada em cinco níveis de fragilidade, classificados entre 1 (muito baixa fragilidade) e 5 (muito alta fragilidade), de acordo com os referenciais metodológicos de Ross (1994; 2012). Como as variáveis apresentavam escalas originais distintas, por exemplo, declividade é expressa em porcentagem e a pluviometria é definida pela precipitação em milímetros, tornou-se necessária a normalização dos dados para uma escala comum, conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4. Notas e classes de fragilidade.

Nota	Classe de Fragilidade
1	Muito baixa
2	Baixa
3	Média
4	Alta
5	Muito Alta

Fonte: Ross (1994; 2012). Adaptado pelo autor (2025).

Para isso, as bases originalmente em formato vetorial foram convertidas em raster, por meio do processo *Rasterizar* do software QGIS, adotando resolução espacial de 30 metros por pixel. Já os dados que estavam em formato raster foram reclassificados a partir da ferramenta *Reclassificar por tabela*, garantindo a uniformidade entre os fatores. Essa uniformização garantiu que todos os condicionantes ambientais compartilhassem a mesma unidade de análise, viabilizando sua sobreposição e permitindo a aplicação da álgebra de mapas.

Para fins de padronização da classe de fragilidade por variável pluviométrica, adotou-se a metodologia de Ross (2012), que estabelece cinco níveis hierárquicos de fragilidade baseados na variabilidade da precipitação (Tabela 5). Esses níveis vão desde situações de regularidade anual com volumes pouco acima de 1.000 mm (nota 1 – muito baixo) até condições extremas, com volumes superiores a 2.500 mm ou inferiores a 900 mm em contextos semiáridos (nota 5 – muito alto).

Tabela 5. Classes de fragilidade por variável pluviométrica.

Nota	Classe de fragilidade	Distribuição de chuvas
1	Muito baixa	Situação com distribuição regular de chuvas ao longo do ano, com volumes anuais não muito acima de 1000 mm/ano.
2	Baixa	Situação com distribuição regular de chuvas ao longo do ano, com volumes anuais não muito superiores a 2000 mm/ano.
3	Média	Situação com chuvas anuais distribuídas de forma irregular, apresentando períodos secos de 2 a 3 meses no inverno; no verão há maiores intensidades entre dezembro e março, com volumes de 1300 a 1600 mm/ano.
4	Alta	Situação com distribuição irregular das chuvas ao longo do ano, com período seco entre 3 e 6 meses e forte concentração de chuvas no verão, entre novembro e abril, quando ocorre de 70% a 80% do total da precipitação anual, com volumes de 1600 a 1800 mm/ano.
5	Muito Alta	Situação com distribuição de chuvas regular ou não ao longo do ano, com volumes anuais elevados superiores a 2500 mm/ano; ou ainda, comportamento irregular das chuvas durante o ano, com episódios de alta intensidade e volumes anuais baixos, geralmente abaixo de 900 mm/ano (semiárido).

.Fonte: Adaptado de Ross (2012).

Para a padronização da variável declividade, tomou-se como referência a metodologia proposta por Ross (2012), que estabelece a correspondência entre faixas de declividade e níveis de fragilidade ambiental. Entretanto, realizou-se um ajuste metodológico com base na classificação da Embrapa (1979), uma vez que essa categorização já havia sido utilizada na elaboração do mapa de declividade em detalhe municipal, garantindo compatibilidade direta com os produtos gerados para cada município da BHRP. Dessa forma, evitou-se um processo de dupla reclassificação do mesmo dado. A equivalência entre as duas propostas e a atribuição das notas de fragilidade (1 a 5) encontram-se apresentadas na Tabela 6, assegurando alinhamento e comparabilidade com os demais fatores analisados.

Tabela 6. Classes de fragilidade para a variável declividade.

Notas	Classe de fragilidade	Classes de Declividade (Ross, 1994; 2012)	Classes de Declividade (Embrapa, 1979)
1	Muito Baixa	0-2 %	Plano (0-3%)
2	Baixa	3-15%	Suave ondulado (3-8%)
3	Média	16-30%	Ondulado (8-20%)
4	Alta	31-50%	Forte ondulado (20-45%)
5	Muito Alta	> 50%	Montanhoso (45-75%) Escarpado (acima de 75%)

Fonte: Adaptado de Ross (1994; 2012).

Para fins de padronização da fragilidade ambiental variável de uso e ocupação das terras, utilizou-se a metodologia de Ross (1994; 2012), revisitada por Traficante (2016), que estabelece uma correspondência entre as classes de cobertura e as notas de fragilidade. Essa adaptação foi necessária para compatibilizar os tipos de uso do MapBiomas às cinco classes hierárquicas de fragilidade (1 = muito baixa a 5 = muito alta). A tabela comparativa entre as propostas de Ross e Traficante encontra-se na Tabela 7.

Tabela 7. Classes de fragilidade para a variável uso e ocupação.

Nota	Classe de fragilidade	Tipo de cobertura (Ross, 1994; 2012)	Tipo de cobertura (Traficante, 2016)
1	Muito Baixa	Proteção muito alta dos solos, florestas primárias e secundárias em estágio avançado de regeneração.	Florestas/Matas naturais, florestas cultivadas com biodiversidade, incluindo as matas ciliares.
2	Baixa	Alta proteção dos solos, presença de florestas densas de cerrado, áreas de silvicultura com cobertura herbácea.	Formação arbustiva naturais com estrato herbáceo denso, formações arbustivas densas, silvicultura de eucaliptos com sub bosque de nativas, áreas úmidas ou de várzea, Cerrado
3	Média	Proteção média dos solos em lavouras de ciclo longo, com curvas de nível e terraceamento, presença de forrageiras entre ruas de café, além de citros, mamão, silvicultura e pastagens com baixo pisoteio de gado.	Cultivo de ciclo longo em curvas de nível/terraceamento como café, laranja.
4	Alta	Proteção fraca dos solos em lavouras de ciclo longo sem forrageiras entre ruas, e de ciclo curto apenas com terraceamento e curvas de nível.	Culturas como pimenta do reino, arroz, trigo, feijão, soja, milho, algodão, cana de açúcar.
5	Muito Alta	Proteção muito fraca dos solos, áreas desmatadas com práticas de queimada, solos expostos para cultivo e movimentação de terra, lavouras de ciclo curto sem práticas de conservação.	Áreas desmatadas e queimadas, solo exposto, pastagens degradadas área urbana

Fonte: Adaptado de Ross (1994; 2012) por Traficante (2016)

Para assegurar a padronização da análise da fragilidade ambiental, as classes de solos da bacia foram reclassificadas de acordo com a metodologia proposta por Ross (1994; 2012), com as devidas adaptações ao contexto local. Esse procedimento permitiu estabelecer uma correspondência entre os diferentes tipos de solos identificados e os níveis de fragilidade, variando de muito baixa a muito alta.

Atribuíram-se notas de 1 a 5, considerando critérios como profundidade, drenagem, textura e estágio de evolução pedogenética (Tabela 8).

Tabela 8. Classes de fragilidade para a variável solo.

Nota	Classe de fragilidade	Classe de solos (Ross, 1994; 2012)
1	Muito Baixa	Solos profundos, bem drenados, Latossolos argilo-arenosos e argilosos porosos, Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho escuro e Vermelho amarelo textura argilosa.
2	Baixa	Solos profundos, bem drenados, de textura média, Latossolos arenosos e Latossolo Amarelo e Vermelho amarelo textura média/argilosa.
3	Média	Solos de profundidade moderada, textura média, Argissolos franco-arenosos, Nitossolos, Latossolo Vermelho amarelo, Terra Roxa, Terra Bruna e Podzólico Vermelho-amarelo textura média/argilosa.
4	Alta	Solos rasos com horizonte B muito espesso, de transição abrupta — Cambissolos e Podzólico Vermelho-amarelo textura média/arenosa.
5	Muito Alta	Solos rasos e pedregosos ou arenosos, orgânicos, com alto grau de hidromorfismo, Neossolos litólicos/arenosos, Gleissolos, Espodossolos, Tiomórficos e Podzolizados com cascalho, Litólicos, Areias Quartzosas e Área urbana.

Fonte: Adaptado de Ross (1994; 2012).

Para possibilitar a integração dos dados geológicos ao modelo de fragilidade, foi realizada a padronização das classes litológicas conforme a metodologia proposta por Crepani et al. (2001). O autor associa a vulnerabilidade natural dos diferentes litotipos a uma escala decimal entre 1,0 e 3,0, relacionando a resistência das rochas ao intemperismo e à erosão. Entretanto, visando à compatibilidade com os demais fatores ambientais deste estudo, os valores foram adaptados segundo a releitura de Matos (2020), que os redistribuiu para cinco classes de fragilidade, de muito baixa (nota 1) a muito alta (nota 5), conforme sugerido por Ross (1994; 2012). A correspondência

das unidades litológicas com as classes de fragilidade encontra-se sistematizada na Tabela 9.

Tabela 9. Classes de fragilidade para a variável geologia.

Nota Classe de fragilidade		Litotipos (Rochas)
1	Muito Baixa	Quartzitos ou metaquartzitos/Riólito, Granito, Dacito/Granodorito, Quartzo Diorito, Granulitos/Migmatitos, Gnaisses/Fenólito, Nefelina Sienito, Traquito, Sienito
2	Baixa	Andesito, Diorito, Basalto/Anortosito, Gabro, Peridotito/Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita, Clorita xisto/Piroxenito, Anfibolito Kimberlito, Dunito.
3	Média	Hornblenda, Tremolita, Actinolita xisto/Estaurolita xisto, Xistos granatíferos/Filito, Metassiltito/Ardósia, Metargilito.
4	Alta	Mármore/Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos/Conglomerados, Subgrauvacas/Grauvascas, Arcózios.
5	Muito Alta	Siltitos, Argilistos/ Folhelhos/ Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos/Sedimentos Inconsolidados: aluviões, colúvios.

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001) por Matos (2020).

4.3.3 Aplicação do Processo Hierárquico Analítico

O AHP é uma metodologia multicritério amplamente empregada em análises de decisão complexas. Sua aplicação consiste em decompor o problema em uma estrutura hierárquica, permitindo a comparação par a par dos critérios envolvidos. Esse procedimento facilita a atribuição de pesos relativos a cada fator de análise, garantindo maior consistência na priorização das variáveis, conforme Saaty (1980, 2005).

Neste estudo, o AHP foi empregado com o objetivo de atribuir pesos relativos aos condicionantes ambientais selecionados. Para tanto, seguiu-se uma sequência metodológica, composta pelas seguintes etapas: (i) elaboração da matriz de comparação pareada, (ii) normalização da matriz, (iii) cálculo do autovetor de prioridades, (iv) verificação da consistência dos julgamentos por meio do cálculo do índice de consistência (IC) e da razão de consistência (RC).

A primeira etapa consiste na elaboração de uma matriz quadrada de comparação pareada, na qual os critérios são comparados dois a dois (Tabela 10). A cada comparação, é atribuída uma escala de importância relativa, fundamentada na escala de valores para a comparação pareada, que varia de 1 a 9.

Tabela 10. Matriz de comparação pareada.

	F1	F2	...	Fn
F1	$f1/f1$	$f2/f1$	...	$f1/fn$
F2	$f2/f1$	$f2/f2$	...	$f2/fn$
...	...	...	...	...
Fn	$fn/f1$	$fn/f2$	...	fn/fn

Fonte: Saaty (1980)

O valor 1 corresponde a igual importância entre os critérios; os valores 3, 5, 7 e 9 indicam diferentes intensidades de importância de um critério em relação a outro; e os valores intermediários (2, 4, 6 e 8) representam níveis transitórios de julgamento (Tabela 11). A matriz é recíproca, isto é, se o critério i é considerado mais importante que o critério j com valor a_{ij} , a relação inversa será representada por $1/a_{ij}$.

Tabela 11. Escala de valores para a comparação pareada.

Escala de Importância	Definição na comparação pareada
1	Dois fatores são igualmente importantes para o objetivo.
3	Um fator é moderadamente importante sobre outro para o objetivo.
5	Um fator é fortemente importante sobre outro para o objetivo.
7	Um fator é muito fortemente importante sobre outro para o objetivo.
9	Um fator é extremamente importante sobre outro para o objetivo.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários.

Fonte: Saaty (1980).

Após a construção da matriz de comparação, procede-se à normalização, de modo a uniformizar os valores e garantir comparabilidade. Este processo envolve a soma dos elementos de cada coluna e a subsequente divisão de cada valor pelo total de sua respectiva coluna. Como resultado, cada coluna passa a somar 1 (ou 100%), e cada célula passa a representar a proporção relativa da importância de um critério. Essa transformação é essencial para que o cálculo dos pesos ocorra de forma proporcional e consistente.

O passo seguinte corresponde ao cálculo do autovetor de prioridades (pesos). Para cada linha da matriz normalizada, calcula-se a média aritmética dos valores, resultando em um vetor de pesos relativos que expressa a importância de cada critério em relação aos demais. O autovetor é normalizado de forma que a soma de todos os pesos seja igual a 1, condição necessária para sua utilização em operações de combinação linear ponderada, na álgebra de mapas aplicada neste estudo.

Como a atribuição de pesos envolve julgamentos subjetivos, é necessário verificar a coerência das comparações (Saaty, 2005). Essa verificação é feita por meio do cálculo de:

$\lambda_{\text{máx}}$ (lambda máximo): obtido a partir do produto entre a matriz original e o autovetor. Cada valor resultante é dividido pelo peso correspondente por meio da função `MATRIZ.MULT`, e a média gera o $\lambda_{\text{máx}}$. Se os julgamentos forem coerentes, $\lambda_{\text{máx}}$ será próximo ao número de critérios avaliados (n). Valores distantes indicam contradições.

Índice de Consistência (IC): calculado pela fórmula:

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} \quad (1)$$

onde n é o número de critérios.

Razão de Consistência (RC): calculada pela razão entre IC e o Índice Randômico (RI), que apresenta valores de referência para matrizes geradas aleatoriamente (Tabela 12).

$$RC = \frac{IC}{RI} \quad (2)$$

Quando $RC \leq 0,1$, os julgamentos são considerados consistentes; caso contrário, a matriz deve ser revisada.

Tabela 12. Índice Randômico (RI) para matrizes de diferentes ordens (n).

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

Fonte: Saaty (1980)

4.3.4 Combinação Linear Ponderada e geração do mapa de fragilidade

A CLP permite integrar múltiplas camadas de informação espacial de acordo com pesos atribuídos a cada critério. Nesse processo, os pesos calculados pelo AHP são aplicados na álgebra de mapas, resultando em uma representação espacial da fragilidade ambiental. Neste estudo, realizou-se a álgebra de mapas, multiplicando cada raster pelo peso correspondente e somando os resultados pixel a pixel. Essa operação foi executada por meio da ferramenta *Raster Calculator* do QGIS, segundo a expressão:

$$Fragilidade = (F_1 * w_1) + (F_2 * w_2) + \dots + (F_n * w_n) \quad (3)$$

Onde:

- F_n representa cada fator temático
- w_n representa o peso associado

O resultado gerou um mapa raster de fragilidade ambiental, no qual cada pixel representava a intensidade da classe atribuída, com resolução espacial de 30 metros. Para fins de quantificação das áreas, o raster foi convertido em formato vetorial utilizando a ferramenta *Poligonizar*. Posteriormente, aplicou-se a ferramenta *Dissolver* para unificar polígonos de mesma classe, possibilitando a mensuração das áreas (em km² e porcentagem) de acordo com as categorias de fragilidade apresentadas na Tabela 4.

4.3.5 Criação do atlas digital

A etapa final da metodologia consistiu na elaboração do atlas digital de fragilidade ambiental, concebido como um produto interativo que organiza, de forma sistematizada, os mapas temáticos produzidos ao longo do estudo. Seu propósito é disponibilizar informações de fácil acesso a pesquisadores, gestores públicos, técnicos e professores, apoiando análises e decisões relacionadas ao ordenamento territorial e à segurança hídrica da BHRP.

Após a aplicação da CLP, cada mapa temático foi exportado do QGIS com sua edição cartográfica, de modo a garantir clareza visual, sendo inseridos elementos essenciais como: título, legenda, escala gráfica e numérica, norte e fonte de dados. Esses produtos foram então organizados e diagramados no Canva, o que permitiu a criação de materiais gráficos complementares apresentados no atlas.

O atlas foi estruturado em um site desenvolvido no Google Sites, plataforma que permite a publicação on-line de conteúdo de forma gratuita, assegurando acesso facilitado e navegação interativa pelos temas abordados. Esse ambiente digital reúne os mapas, textos explicativos, tabelas e demais componentes gráficos do produto.

Complementarmente, foi desenvolvido um aplicativo no Google Earth Engine, no qual foram incorporados a área da BHRP e os limites territoriais dos municípios, juntamente com os dados de fragilidade ambiental processados no QGIS. A organização das camadas e a estruturação da interface foram realizadas mediante programação em JavaScript, possibilitando a visualização dinâmica dos resultados em ambiente interativo.

Por fim, o atlas digital contempla tanto o recorte natural da bacia hidrográfica quanto o recorte administrativo dos municípios integrantes da BHRP. Essa integração entre escalas torna o produto diretamente aplicável ao contexto de gestão pública, permitindo identificar áreas prioritárias para mitigação de impactos e orientar planos e ações municipais de prevenção à degradação ambiental.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Fatores de análise e procedimentos de padronização

5.1.1 Pluviometria da BHRP

A pluviosidade de um território é condicionada por fatores geográficos que podem potencializar ou atenuar os efeitos climáticos. Segundo Novais (2019), mesmo dentro de uma mesma zona de circulação atmosférica, determinadas áreas podem apresentar índices pluviométricos distintos em razão da posição frente aos sistemas produtores de chuva, da orientação do relevo e da proximidade do mar. Essa variabilidade espacial reforça a necessidade de análise localizada de precipitação, sobretudo em estudos voltados à gestão de recursos hídricos e à avaliação da fragilidade ambiental.

Na BHRP, as informações coletadas foram organizadas conforme apresentado na Tabela 13, que reúne as médias mensais das estações sobre a bacia, monitoradas no período analisado (2000 a 2022). A partir desses dados, foi elaborado o Gráfico 2, representando a distribuição sazonal das chuvas.

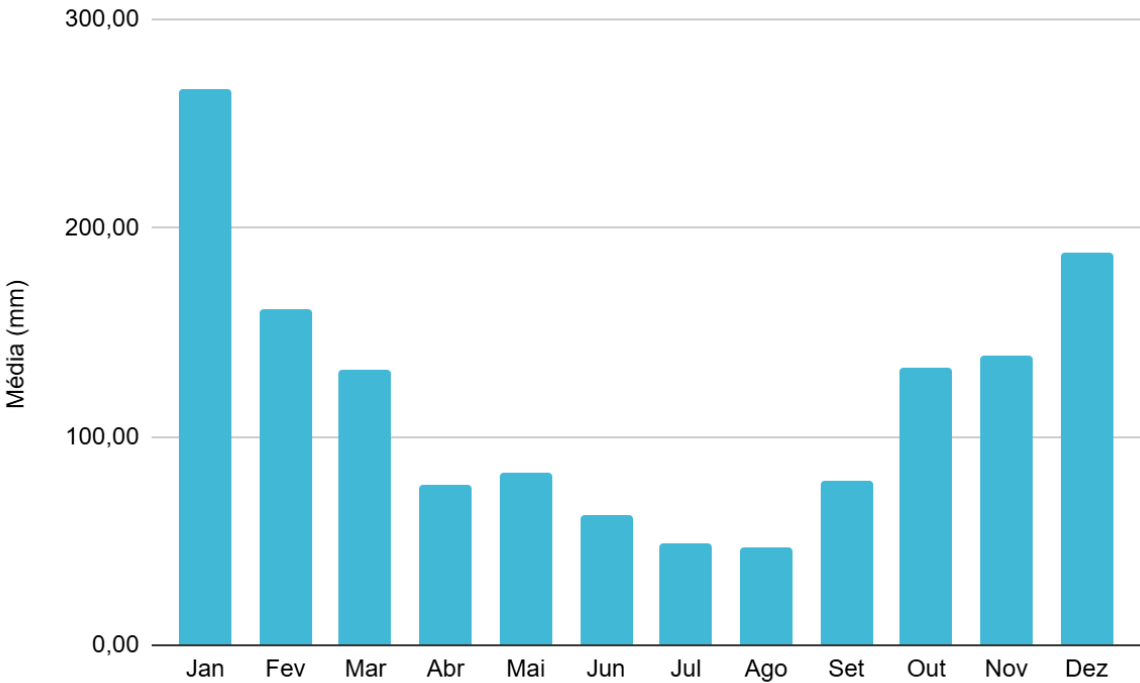
Para espacializar as informações no território da bacia, os dados foram incorporados ao ambiente QGIS e submetidos ao processo de interpolação espacial pelo método *Inverse Distance Weighting (IDW)*. Em seguida, foram geradas as isoietas de precipitação média anual, resultando no mapa de distribuição da precipitação apresentado na Figura 11.

Tabela 13. Precipitação pluviométrica nas estações meteorológicas da bacia.

Município	Estações	Prefixo	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Precipitações Médias Mensais (mm) 2000 a 2022												
					Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média Anual
Águas de Santa Bárbara	Águas de Santa Bárbara	D6-006	22°52'34"	49°14'11"	273,34	171,75	114,49	69,9	73,62	61,01	48,29	44,09	72,78	125,16	153,78	190,59	1398,8
	Avaré	E5-014	23°05'58"	48°54'44"	265,73	153,98	139,75	89,69	78,5	68,98	50,81	49,66	79,85	144,85	136,35	191,84	1449,99
Botucatu	São João do Morro Vermelho	D5-019	22° 49' 34"	48° 26' 15"	281,5	170,15	143,13	75,97	68,25	49,03	43,74	44,69	56,96	123,68	128,76	206,47	1392,33
Canitar	Fazenda Santa Lucia	D6-083	23° 01' 44"	49° 47' 06"	276,43	137,85	124,64	87,52	91,32	66,74	50,97	48,14	90,74	151,64	145,16	181,52	1452,67
Cerqueira César	Cerqueira César	E6-030	23° 02' 24"	49° 09' 46"	246,7	161,15	122,6	76,62	85,7	66,53	47,9	48,37	80,67	135,52	124,57	197,86	1394,19
Chavantes	Fazenda Marcondinha	E6-003	23° 03' 11"	49° 46' 07"	260,66	150,54	117,07	86,57	97,02	71,26	54,62	48,77	99,16	150,37	142,74	190,7	1469,48
Ipaussu	Fazenda Palmeiras	E6-007	23° 01' 45"	49° 34' 05"	275,01	162,89	139,3	75,03	96,4	69,56	61,5	55,81	100,19	150,09	149	189,68	1524,46
Itatinga	Lobo	D5-040	22° 59' 50"	48° 41' 05"	250,08	169,19	126,56	64	66,98	64,58	48,97	44,21	77,86	117,61	137,04	191,05	1358,13
Lençóis Paulista	Gleba Rio Claro	D5-081	22° 46' 18"	48° 52' 36"	268,93	161,08	141,63	74,04	83,01	55,54	43,4	43,42	70,37	116,79	142,67	174,8	1375,68
	Fazenda Nova Niagara	D6-003	22° 57' 00"	49° 23' 00"	254,82	170,47	120,42	79,29	92,87	56,23	47,48	50,4	77,24	137,03	138,14	169,56	1393,95
Ourinhos	Ourinhos	D6-011	22° 59' 00"	49° 50' 00"	251,38	149,3	148,79	85,6	95,16	71,03	54,05	49,32	95	154,96	127,83	167,71	1450,13
Pardinho	Pardinho	E5-060	23°05'06"	48°22'29"	263,45	157,46	141,15	53,65	70,24	60,6	45,39	37,81	71,36	98,88	134,23	164,64	1298,86
Santa Cruz do Rio Pardo	Fazenda São Francisco	D6-102	22° 36' 59"	49° 32' 32"	271,24	169,09	127,38	75,51	84,37	58,92	49,57	42,07	79,86	119,66	134,63	207,35	1419,65
São Manuel	São Manuel	D5-047	22° 44' 12"	48° 34' 04"	299,76	176,93	144,88	77,24	70,48	52,77	43,41	43,22	56,4	133,27	149,85	212,29	1460,5
Média	-	-	-	-	267,07	161,56	132,27	76,47	82,42	62,34	49,29	46,43	79,17	132,82	138,91	188,29	1417,06

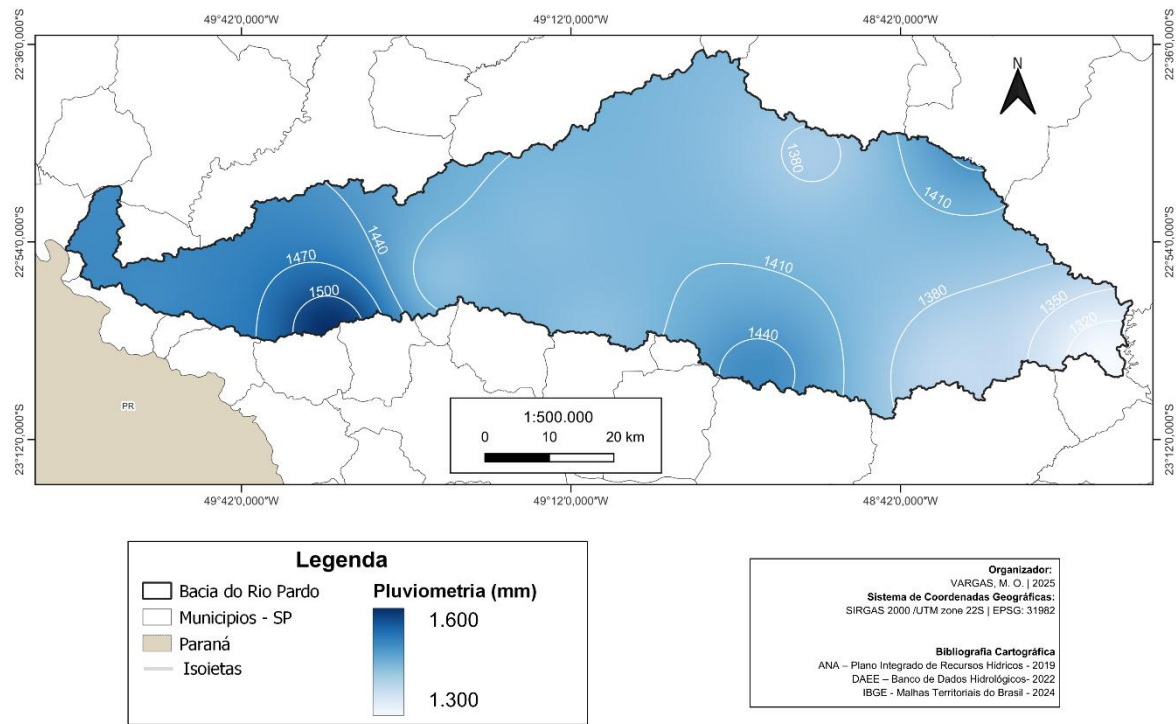
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Gráfico 2. Média pluviométrica nas estações meteorológicas localizadas nos municípios da bacia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

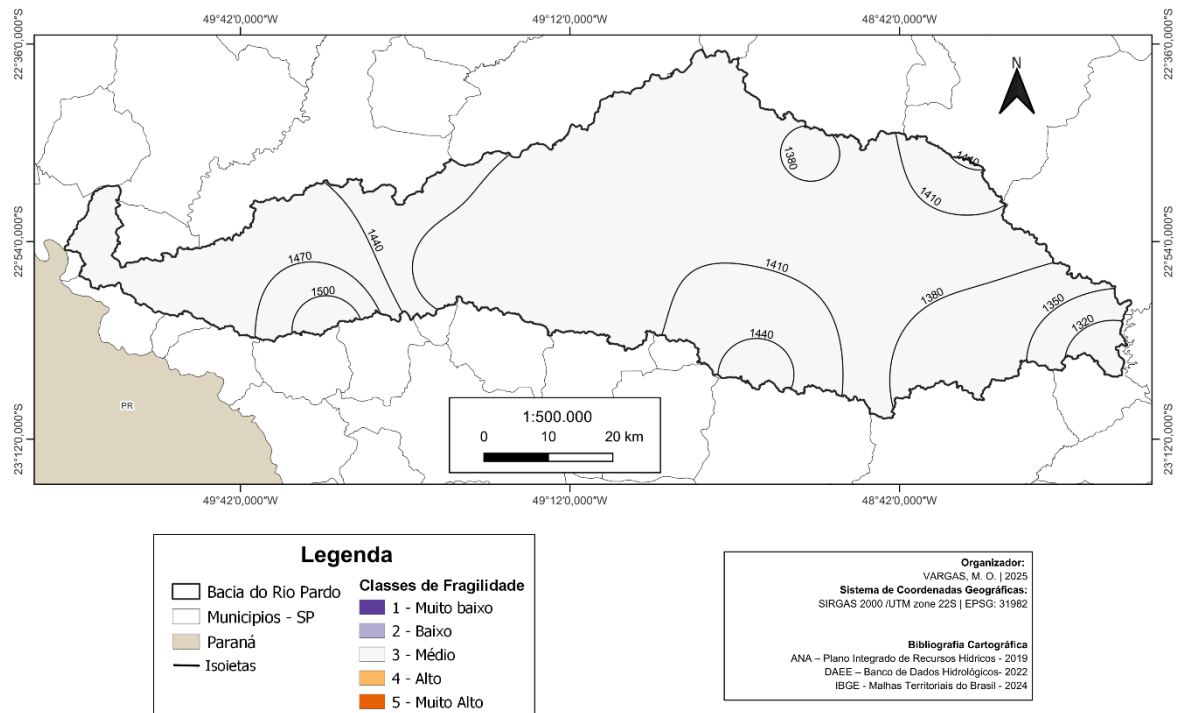
Figura 11. Mapa da distribuição pluviométrica na BHRP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De acordo com as médias registradas pelas estações meteorológicas (Gráfico 2) e com a padronização de Ross (2012), aproximadamente toda a área da BHRP enquadra-se no nível 3 – médio, correspondente a precipitações anuais entre 1.300 e 1.600 mm, distribuídas de forma irregular, com dois a três meses secos no inverno e maior intensidade entre dezembro e março. A reclassificação gerou a camada raster apresentada na Figura 12, que representa a fragilidade frente ao fator pluviometria e foi utilizada como insumo para a integração no modelo final de fragilidade ambiental.

Figura 12. Mapa de fragilidade frente ao fator pluviométrico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.1.2 Declividade da BHRP

Segundo Ramalho Filho e Beek (1995), a declividade é um dos principais atributos do relevo e consiste na medida da inclinação de uma superfície em relação ao plano horizontal, geralmente expressa em porcentagem. Esse parâmetro influencia diretamente processos como erosão, escoamento superficial, restrições ao uso urbano e aptidão agrícola.

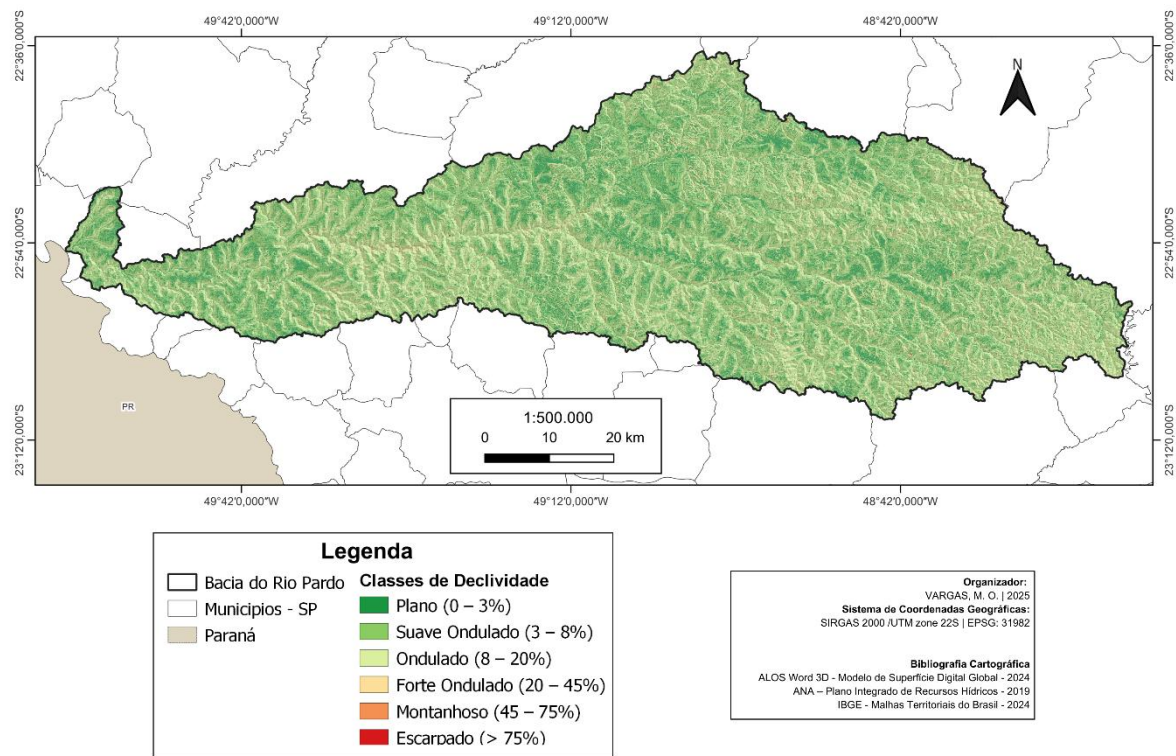
Os autores ainda afirmam que os mapas de declividade constituem produtos de grande importância, pois permitem identificar as condições topográficas de uma área, fornecendo subsídios tanto para análises ambientais quanto para planejamento territorial. Nesse contexto, destaca-se que o aumento da inclinação das vertentes tende a potencializar a velocidade do escoamento hídrico e, conseqüentemente, a perda de solos. Conforme Morgan (2005), a perda de solo é proporcional à intensidade da declividade e ao comprimento das vertentes, dado o incremento no volume e na velocidade da água escoada.

Com o objetivo de estabelecer padrões de classificação do relevo para análises ambientais e agrícolas, a Embrapa (1979) propôs a seguinte categorização:

- a) Plano (0–3%) – superfícies de topografia horizontal ou suavemente esbatida, com declives muito pequenos;
- b) Suave ondulado (3–8%) – superfícies pouco movimentadas, compostas por colinas ou outeiros de baixa amplitude;
- c) Ondulado (8–20%) – superfícies com movimentação moderada, caracterizadas por colinas e outeiros mais expressivos;
- d) Forte ondulado (20–45%) – superfícies movimentadas, com morros ou outeiros de maior amplitude relativa;
- e) Montanhoso (45–75%) – superfícies vigorosas e acidentadas, geralmente associadas a morros ou alinhamentos montanhosos;
- f) Escarpado (> 75%) – superfícies abruptas, incluindo frentes de cuevas, escarpamentos e vertentes fortemente inclinadas.

Para este estudo, a declividade foi derivada a partir do MDE do ALOS World 3D (30m), disponibilizado pela JAXA. O processamento foi realizado no QGIS, utilizando a ferramenta de análise *Declividade*, que gerou o raster de declividade expresso em porcentagem. Em seguida, aplicou-se a ferramenta de *Reclassificação por Tabela*, a fim de organizar os intervalos de inclinação segundo as classes propostas pela Embrapa (1979). O resultado desse procedimento está apresentado no Mapa de Declividade da Bacia (Figura 13).

Figura 13. Mapa de declividade da BHRP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise das classes de relevo revelou que a BHRP é predominantemente caracterizada por áreas de relevo suave ondulado (44,78%) e plano (34,98%), que juntas somam aproximadamente 80% da área total. O relevo ondulado representa 18,48%, enquanto áreas classificadas como forte ondulado perfazem 1,66%. Já as classes mais acidentadas – montanhoso e escarpado – correspondem a menos de 0,2% da área (Tabela 14).

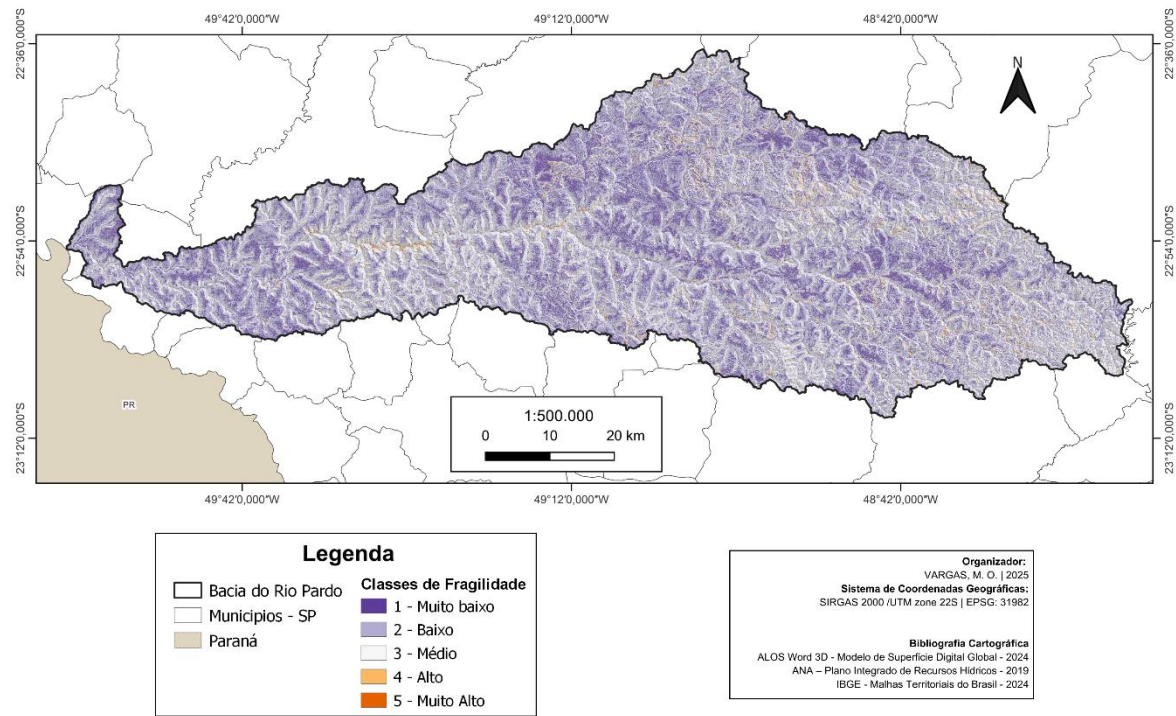
Tabela 14. Declividade da Bacia do Rio Pardo.

Declividade (%)	Classes de Relevo	Área do mapa	
		km²	%
0 - 3	Plano	1681,763	34,98%
3 - 8	Suave ondulado	2.152,795	44,78%
8 - 20	Ondulado	888,255	18,48%
20 - 45	Forte ondulado	79,839	1,66%
45 -75	Montanhoso	0,208	0,004%
>75	Escarpado	4,424	0,09%
Área total		4.807,284	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O processo de reclassificação resultou no mapa de fragilidade frente ao fator declividade (Figura 14), no qual se observa a predominância de áreas de fragilidade baixa a média, que juntas representam mais de 63% da área total da bacia. As classes de fragilidade alta e muito alta foram pouco expressivas, não ultrapassando 2% do território, concentrando-se em setores de maior inclinação. A distribuição das classes reclassificadas encontra-se sistematizada na Tabela 15. Esse produto cartográfico serviu como um dos insumos para a integração dos fatores na construção do mapa final de fragilidade ambiental emergente da bacia.

Figura 14. Mapa de fragilidade frente ao fator declividade.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 15. Notas e classes de fragilidade atribuídas ao fator declividade.

Declividade (%)	Fragilidade		Área do mapa	
	Nota	Classe	km²	%
0 - 3	1	Muito baixa	1.681,763	34,98%
3 - 8	2	Baixa	2.152,795	44,78%
8 - 20	3	Média	888,255	18,48%
20 - 45	4	Alta	79,839	1,66%
45 - 75 e > 75	5	Muito alta	4,632	0,10%
Área total			4.807,284	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.1.3 Uso e ocupação da BHRP

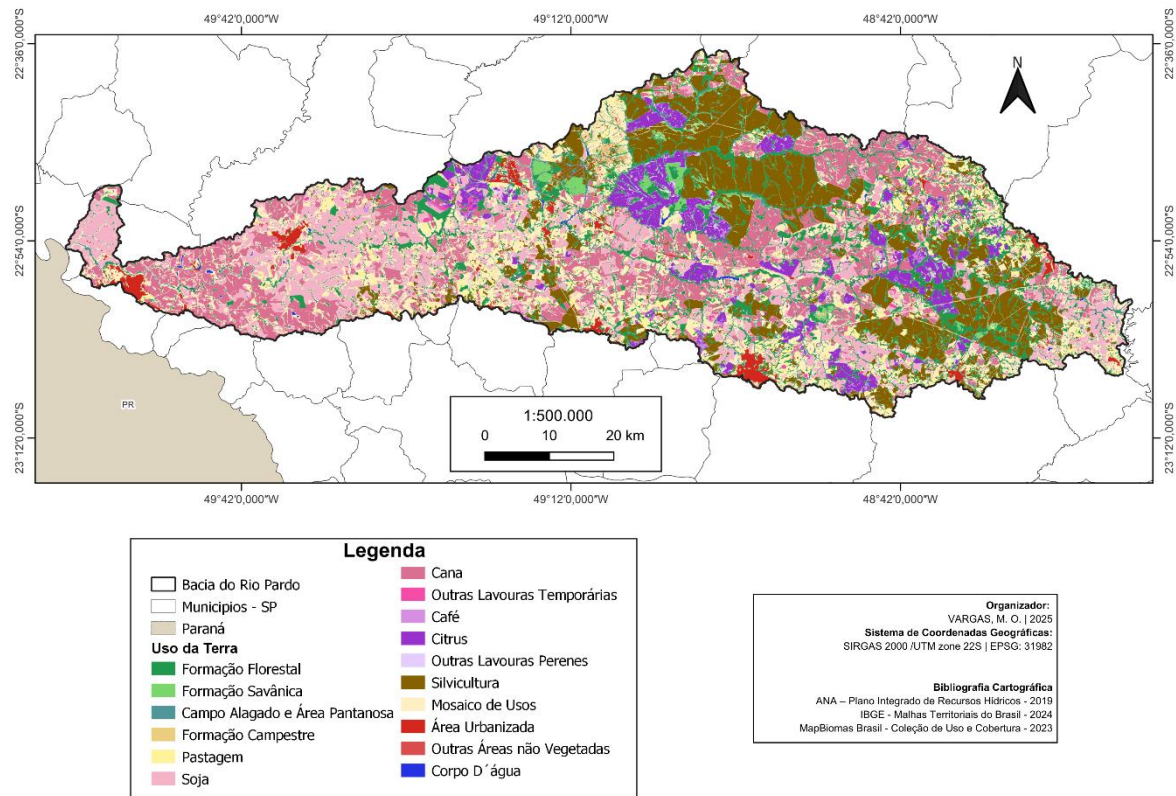
O uso e a ocupação da terra constituem em um dos elementos centrais na análise da fragilidade ambiental emergente, uma vez que expressam diretamente as formas pelas quais a sociedade se apropria e transforma os recursos naturais. Como destaca Traficante (2016), a expansão demográfica impulsionada pela

industrialização dos últimos séculos e estimulada pelo sistema econômico vigente lança sobre os recursos naturais, em especial os hídricos, uma pressão inevitável. Nesse contexto, compreender as dinâmicas de ocupação é fundamental para interpretar os padrões de degradação ambiental.

Conforme apontam Kamusoko e Aniya (2007), as rápidas mudanças no uso e na cobertura da terra, aliadas à fragmentação da paisagem, resultam de um desequilíbrio entre pressões demográficas, expansão agrícola, políticas governamentais e fatores ambientais. Essa dinâmica evidencia como o ordenamento territorial reflete processos sociais e econômicos vigentes, revelando condicionantes e consequências da expansão urbana e agrícola. Geist e Lambin (2002) reforçam que o principal agente da fragmentação das paisagens tropicais é a ação antrópica, principalmente por meio do desflorestamento e da conversão de áreas naturais em uso agrícola.

A base de dados empregada para o levantamento do uso e ocupação da terra da BHRP foi o MapBiomas (Coleção 9.0, 2023). Para este estudo, os dados foram importados no QGIS, convertidos de raster para vetor, permitindo a quantificação e a análise da distribuição espacial das classes de cobertura e uso. O resultado do processamento está apresentado no Mapa de Uso e Ocupação da Terra (Figura 15), que ilustra o tipo de cobertura presente na bacia.

Figura 15. Mapa de uso e ocupação da terra na BHRP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise evidenciou que predominam atividades agropecuárias, com destaque para a cana-de-açúcar (17,98%), a silvicultura (17,17%), o mosaico de usos (17,11%) e a soja (13,46%). Em contrapartida, áreas de vegetação natural ainda presentes, como formações florestais (13,17%) e savânicas (1,50%), ocupam porções menos expressivas. Áreas urbanizadas e outros espaços não vegetados somam cerca de 2,3% da superfície da bacia. Esses resultados encontram-se sistematizados na Tabela 16, que apresenta a participação percentual de cada classe de uso e ocupação da terra.

Tabela 16. Uso e ocupação da terra na BHRP.

Classes de uso e ocupação da terra		Área do mapa	
		km²	%
Floresta	Formação Florestal	633,198	13,17%
	Formação Savânica	71,984	1,50%
Vegetação Arbustiva e Herbácea	Campo Alagado e Área Pantanosa	118,88	2,47%
	Formação Campestre	22,762	0,47%
Agropecuária	Pastagem	255,652	5,32%
	Soja	647,07	13,46%
	Lavoura Temporária	864,686	17,98%
	Outras Lavouras Temporárias	46,299	0,96%
	Café	33,621	0,70%
	Citrus	306,463	6,37%
	Outras Lavouras Perenes	31,922	0,66%
	Silvicultura	825,578	17,17%
	Mosaico de Usos	823,037	17,11%
	Área Urbanizada	90,997	1,89%
Área não Vegetada	Outras Áreas não Vegetadas	18,076	0,38%
Corpo D'água	Rio, Lago e Oceano	18,766	0,39%
Área total		4.808,99	100%

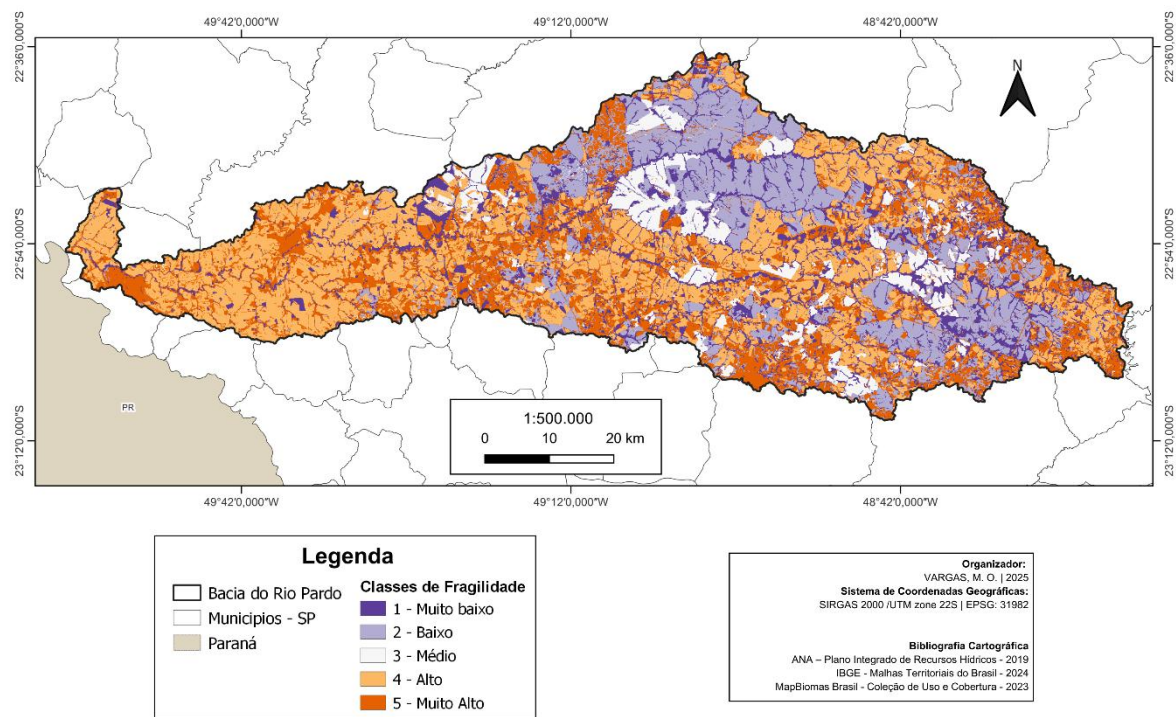
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O processo de reclassificação resultou no mapa de fragilidade frente ao fator uso e ocupação da terra (Figura 16). De acordo com os dados obtidos (Tabela 17), observa-se que a classe de fragilidade alta predomina na bacia (32,40%), associada sobretudo às lavouras temporárias (soja e cana-de-açúcar). Em seguida, destacam-se as áreas de fragilidade muito alta (24,69%), correspondentes às pastagens, mosaico de usos e áreas urbanizadas; e de fragilidade baixa (21,61%), relacionadas a formações savânicas, áreas úmidas e silvicultura. A classe de fragilidade média, ligada às lavouras perenes (citrus e café), engloba 7,74% do território. Já as áreas de

fragilidade muito baixa, compostas principalmente por formações florestais e corpos d'água, representam apenas 13,55% da área total. Essa distribuição confirma a forte pressão antrópica sobre a bacia.

Quando o solo mantém sua cobertura vegetal, o escoamento superficial é reduzido, pois parte da água da chuva é interceptada pela vegetação e pela serapilheira, diminuindo o impacto direto das gotas sobre o solo e favorecendo a infiltração (Matos, 2020). Embora a pastagem seja, em alguns contextos, associada a condições intermediárias de proteção, neste trabalho ela foi classificada como classe de fragilidade 5 (muito alta). Essa decisão metodológica fundamenta-se em Traficante (2016), que demonstrou que grande parte das áreas de pastagens na região de Botucatu apresenta degradação significativa, caracterizada por baixa cobertura vegetal. Considerando que parcela expressiva dos cerca de 5% da área ocupada por pastagens na BHRP se concentra próxima, optou-se por tratá-las como fator de intensificação da fragilidade ambiental.

Figura 16. Mapa de fragilidade frente ao fator uso e ocupação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 17. Notas e classes de fragilidade atribuídas ao fator uso e ocupação.

Classes de uso e ocupação da terra	Fragilidade		Área do mapa	
	Nota	Classe	km²	%
Formação Florestal, Corpo D'água	1	Muito baixa	651,777	13,55%
Formação Savânica, Campo Alagado e Área Pantanosa, Formação Campestre e Silvicultura	2	Baixa	1.039,127	21,61%
Café, Citrus e Outras Lavouras Perenes	3	Média	372,26	7,74%
Soja, Cana e Outras Lavouras Temporárias	4	Alta	1.558,202	32,40%
Pastagem, Mosaico de Usos, Área Urbanizada e Outras Áreas não Vegetadas	5	Muito alta	1.187,556	24,69%
Área total			4.808,922	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.1.4 Pedologia da BHRP

O solo constitui um elemento central do sistema ambiental, funcionando como interface entre a litosfera, atmosfera, hidrosfera e biosfera. Como afirma Queiroz Neto (2011), sua análise não pode ser realizada isoladamente, pois ele representa o espaço no qual se manifestam processos dinâmicos que envolvem água, ar, organismos e matéria orgânica, sendo determinante para o equilíbrio ecológico.

Essa concepção é corroborada pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos, 2025), que define o solo como um corpo natural tridimensional, dinâmico e vivo, formado por minerais e matéria orgânica, organizado em horizontes distintos e sujeito à ação de fatores pedogenéticos como clima, organismos, relevo e tempo. Nesse sentido, a pedologia desempenha papel essencial para os estudos de fragilidade ambiental, uma vez que diferentes classes de solos apresentam resistências e suscetibilidades diferenciadas frente à erosão, à ocupação antrópica e ao uso agrícola.

Segundo Rossi (2017), a BHRP apresenta uma significativa diversidade pedológica, resultante de distintos processos de pedogênese, que originaram seis classes principais de solos: Gleissolos Háplicos (GX11), Latossolos Vermelhos (LV21), Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA6), Nitossolos Vermelhos (NV15), Argissolos Vermelho-Amarelos (PVA14) e Neossolos Litólicos (RL10).

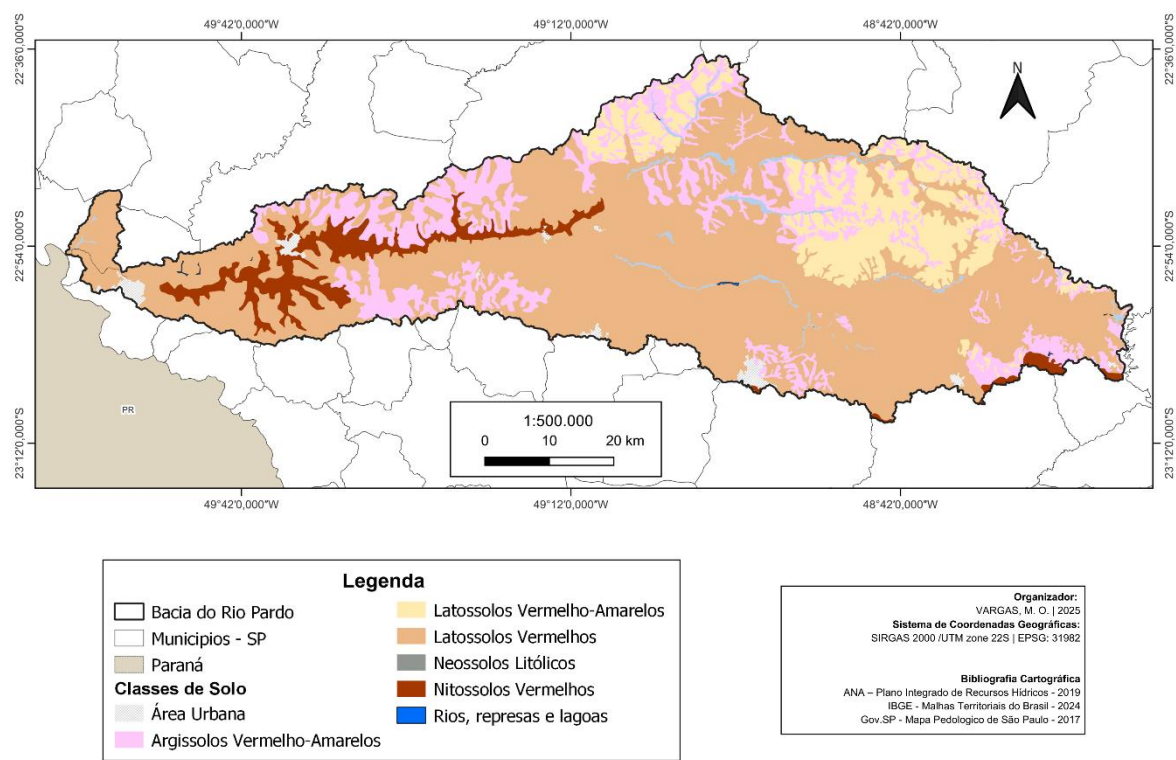
Conforme Santos et al. (2025), esses solos podem ser agrupados em grandes categorias: os Gleissolos, caracterizados pela hidromorfia expressa em forte gleização; os Latossolos, marcados por evolução pedogenética muito avançada, associada ao processo de latossolização; os Nitossolos, também de evolução avançada, definidos pela intensa hidrólise; os Argissolos, que apresentam acúmulo de argila no horizonte subsuperficial; e os Neossolos, pouco evoluídos, em formação, devido à baixa atuação dos processos pedogenéticos ou às características do material de origem.

Segundo o levantamento de Rossi (2017), as principais características dos solos da bacia são:

- a) Gleissolos Háplicos (GX11): solos eutróficos ou distróficos, de textura argilosa, pouco profundos, associados a relevo plano, vinculados a condições de encharcamento.
- b) Latossolos Vermelho-Amarelos (LV21): solos distróficos, muito profundos, de textura média, associados a relevos suaves ondulados, com baixa fertilidade natural, mas elevada estabilidade estrutural.
- c) Latossolos Vermelhos (LVA6): também distróficos, muito profundos, de textura média, predominantes em áreas de relevo suave ondulado a ondulado.
- d) Nitossolos Vermelhos (NV15): solos eutroféricos, profundos a muito profundos, de textura muito argilosa, com boa fertilidade natural, associados a relevos suaves ondulados.
- e) Argissolos Vermelho-Amarelos (PVA14): distróficos, de textura argilosa a média, com acúmulo de argila em horizonte subsuperficial, predominantes em relevos ondulados a suave ondulados.
- f) Neossolos Litólicos (RL10): solos rasos, de textura variada, associados a substratos de basalto, diabásio ou arenito Botucatu, caracterizados por baixa evolução pedogenética.

A distribuição espacial dessas classes de solos pode ser observada no Mapa de Solos da BHRP (Figura 17) e na Tabela 18, que quantifica suas respectivas áreas.

Figura 17. Mapa de solos da BHRP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 18. Classes de solos da BHRP.

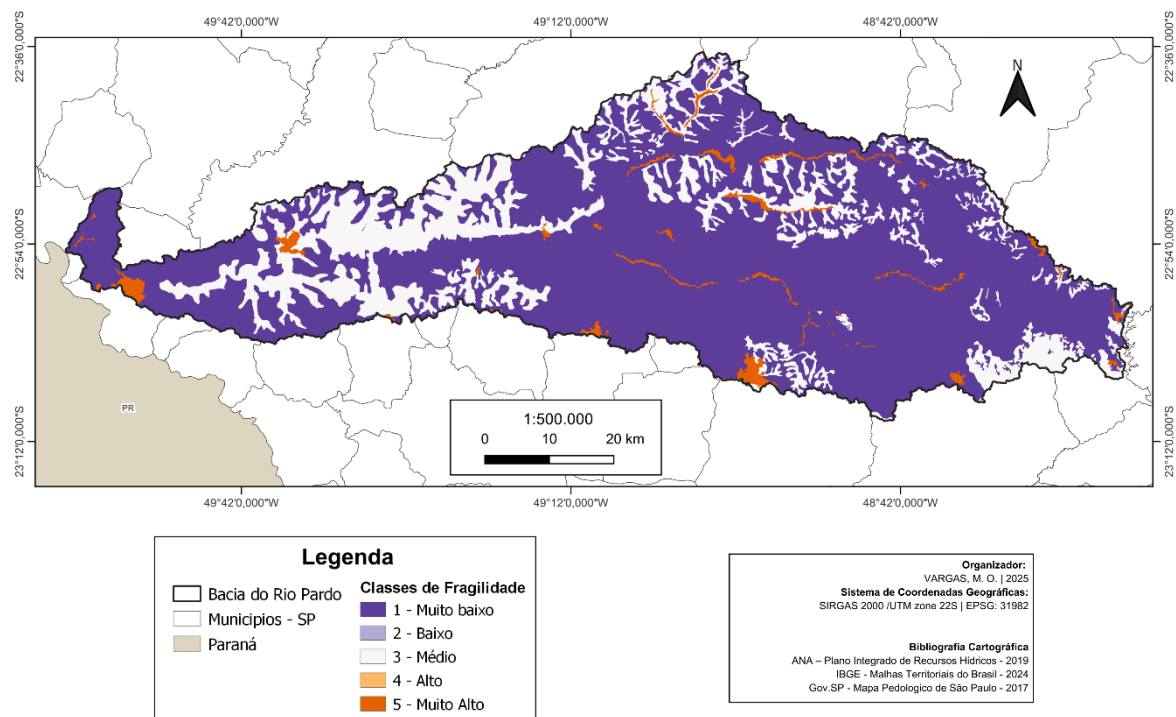
Classes de solos	Área do mapa	
	km²	%
Área Urbana	57,464	1,19%
Gleissolos Háplicos (GX11)	52,346	1,09%
Latossolos Vermelhos (LV21)	3.074,392	63,93%
Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA6)	568,585	11,82%
Nitossolos Vermelhos (NV15)	260,301	5,41%
Argissolos Vermelho-Amarelos (PVA14)	791,307	16,45%
Neossolos Litólicos (RL10)	0,546	0,01%
Rios, represas e lagoas	4,051	0,08%
Área total	4.808,992	100%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O processo de reclassificação resultou no Mapa de Fragilidade frente ao fator Pedologia (Figura 18), evidenciando a predominância de áreas de fragilidade muito

baixa, representadas pelos Latossolos, que somam 75,8% da área total da bacia. Em contrapartida, os Argissolos e Nitossolos compõem cerca de 21,8% do território, caracterizando a classe de fragilidade média. As áreas de maior vulnerabilidade (Gleissolos, Neossolos e áreas urbanas) correspondem a 2,3% da área total, embora exerçam forte influência local na dinâmica de uso e ocupação. A quantificação das classes reclassificadas está apresentada na Tabela 19.

Figura 18. Mapa de fragilidade frente ao fator solo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 19. Notas e classes de fragilidade atribuídas ao fator solo.

Classes de Solos	Fragilidade		Área do mapa	
	Nota	Classe	km²	%
Latossolos Vermelhos (LV21), Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA6) e Rios, represas e lagoas	1	Muito baixa	3.647,141	75,84%
-	2	Baixa	0	0,00%
Nitossolos Vermelhos (NV15) e Argissolos Vermelho-Amarelos (PVA14)	3	Média	1.051,49	21,87%
-	4	Alta	0	0,00%
Área Urbana, Gleissolos Hápicos (GX11) e Neossolos Litólicos (RL10)	5	Muito alta	110,287	2,29%
Área total			4808,92	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.1.5 Geologia da BHRP

A geologia constitui um dos elementos fundamentais para a compreensão da fragilidade ambiental, uma vez que está diretamente relacionada aos processos pedogenéticos, geomorfológicos e hidrológicos que moldam a paisagem. Mais do que reconstruir o passado geológico da Terra, o estudo das formações rochosas possibilita identificar e classificar minerais e litotipos, compreender os mecanismos de deposição das rochas sedimentares, de formação das ígneas e de transformação das metamórficas, bem como analisar a dinâmica de elevação e desgaste das montanhas, além de explicar a compartimentação entre continentes e oceanos (Laudan, 1993)). Esse entendimento permite associar a geologia ao comportamento ambiental atual, especialmente na avaliação de fragilidades e potencialidades do território.

Segundo Perrotta et al. (2006), a BHRP apresenta um arcabouço geológico constituído por quatro principais unidades litoestratigráficas: Formação Marília (K2m), Formação Vale do Rio do Peixe (K2vp), Formação Serra Geral (K1_beta_sg) e Depósitos Aluvionares (Q2a), cujas características e composições estão sistematizadas na Tabela 20.

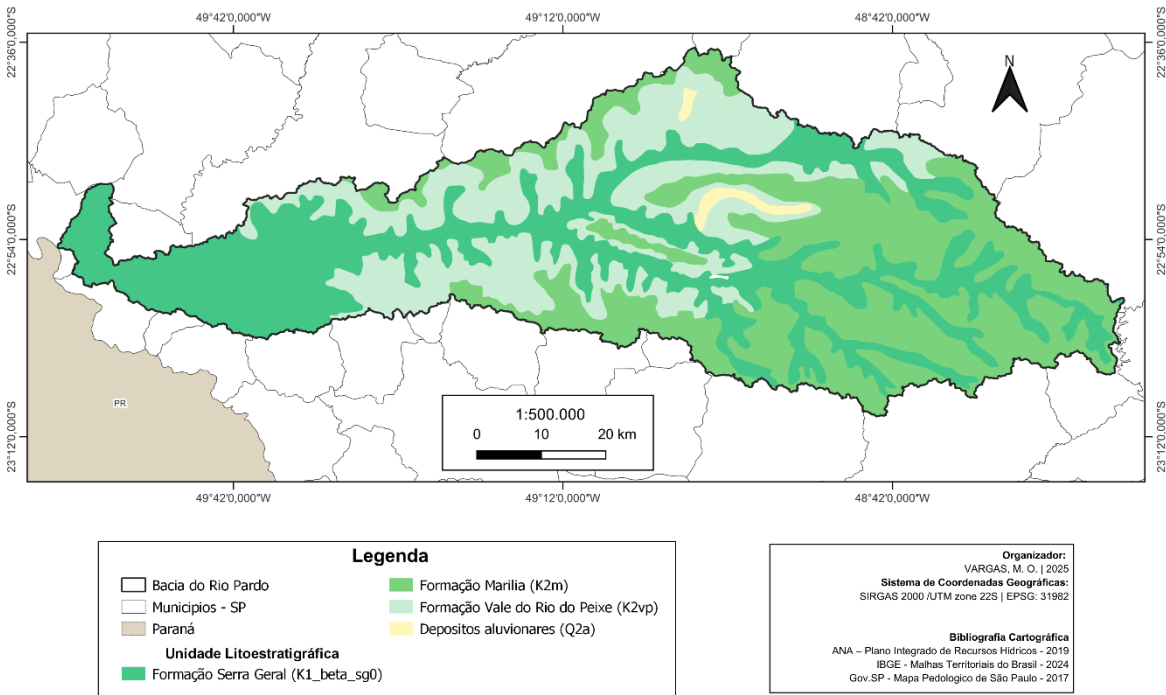
Tabela 20. Tabela geológica com as unidades litoestratigráficas da bacia.

Éon	Era	Período	Época	Unidade Litoestratigráfica
Fanerozoico	Cenozoico	Quaternário	Holoceno	Depósitos aluvionares - Q2a: (Sedimento Aluvionar, areia, areia quartzosa, cascalheira, silte, argila).
				K2m Marília (Arenito grosso a fino, Argilito Arenoso e Calcário).
	Mesozoico	Cretáceo	Superior	K2vp Vale do Rio do Peixe (Arenito fino e muito fino, Argilito Arenoso, Conglomerado, Rocha Sedimentar Vulcanoclástica e Siltito).
			Inferior	K1_beta_sg Serra Geral, Grupo São Bento (Basalto e Dacito).

Fonte: Adaptado de Perrotta et al. (2006).

Essas unidades litológicas apresentam diferentes graus de resistência à erosão e permeabilidade, influenciando tanto a dinâmica superficial quanto a recarga hídrica subterrânea. A espacialização dessas formações pode ser observada no mapa geológico da bacia (Figura 19), enquanto a quantificação das áreas ocupadas encontra-se organizada na Tabela 21.

Figura 19. Mapa geológico da BHRP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 21. Unidades litoestratigráficas da BHRP.

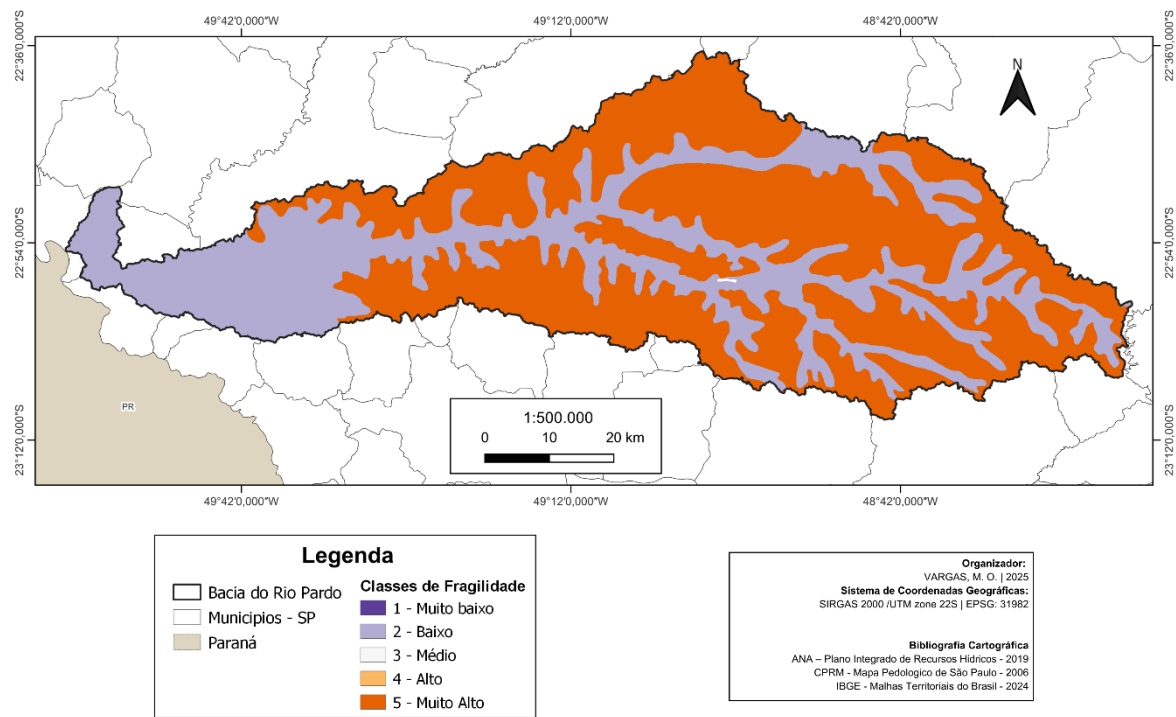
Unidades litoestratigráficas	Área do mapa	
	km ²	%
Formação Marília (K2m)	1.659,82	34,53%
Depósitos aluvionares (Q2a)	45,426	0,94%
Formação Vale do Rio do Peixe (K2vp)	1.266,428	26,34%
Formação Serra Geral (K1_beta_sg)	1.835,871	38,19%
Área total	4.807,545	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os resultados da reclassificação geológica evidenciam a predominância da classe de fragilidade muito alta, que representa 61,81% da área total da bacia. Essa categoria está associada às formações sedimentares Marília e Vale do Rio do Peixe, bem como aos depósitos aluvionares recentes. Embora o arenito, presente nas Formações Marília e Vale do Rio do Peixe, pudesse ser inicialmente classificado com nota quatro (alto), foi atribuído peso cinco (muito alto) em razão de sua granulometria mais suscetível ao intemperismo e da presença de outros litotipos característicos dessas formações que, segundo a releitura de Matos (2020), recebem peso máximo de fragilidade.

Em contrapartida, a classe de fragilidade baixa corresponde a 38,19% da área da bacia, estando associada à Formação Serra Geral, composta por basaltos e outras rochas ígneas de elevada resistência mecânica e baixa vulnerabilidade à erosão. As demais classes de fragilidade não apresentaram ocorrência significativa na área de estudo. A distribuição espacial dessas classes encontra-se ilustrada no mapa de fragilidade frente ao fator geologia (Figura 20) e sintetizada em termos de áreas e percentuais na Tabela 22.

Figura 20. Mapa de fragilidade frente ao fator geologia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 22. Notas e classes de fragilidade atribuídas ao fator geologia.

Unidades litoestratigráficas	Fragilidade		Área do mapa	
	Nota	Classe	km²	%
-	1	Muito baixa	0	0,00%
K1_beta_sg- Serra Geral, Grupo				
São Bento	2	Baixa	1.835,752	38,19%
-	3	Média	0	0,00%
-	4	Alta	0	0,00%
K2m - Marília e Q2a, K2vp - Vale do Rio do Peixe e Depósitos aluvionares	5	Muito alta	2.971,723	61,81%
Área total			4.807,475	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.2 Fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo

5.2.1 Processo de Hierarquia Analítica da bacia

A definição dos pesos relativos entre os fatores ambientais foi realizada por meio do AHP. Esse método fundamenta-se na comparação par a par dos critérios, utilizando a escala de importância proposta por Saaty (1980), que varia de 1 (igual importância) a 9 (importância extrema). O preenchimento da matriz de comparação ocorreu de forma recíproca: quando um critério i recebeu valor a_{ij} em relação a j , a relação inversa foi expressa por $1/a_{ij}$. A matriz resultante encontra-se sistematizada na Tabela 23.

Tabela 23. Matriz de comparação pareada.

Crítérios	Pluviometria	Declividade	Uso da terra	Pedologia	Geologia
Pluviometria	1,00	3,00	3,00	5,00	7,00
Declividade	0,33	1,00	1,00	3,00	5,00
Uso da terra	0,33	1,00	1,00	2,00	4,00
Pedologia	0,20	0,33	0,50	1,00	3,00
Geologia	0,14	0,20	0,25	0,33	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na etapa seguinte, cada coluna da matriz foi normalizada pela soma de seus valores, procedimento que garante a comparabilidade entre os critérios e uniformiza a escala de análise. A partir dessa matriz normalizada, realizou-se o cálculo do vetor de prioridades, correspondente aos pesos atribuídos a cada fator ambiental. Esses resultados encontram-se sistematizados na Tabela 24, que apresenta os valores finais utilizados na ponderação dos critérios.

Tabela 24. Pesos atribuídos aos fatores adotados.

Fatores	Pesos
Pluviometria	0,471
Declividade	0,207
Uso da terra	0,179
Pedologia	0,097
Geologia	0,046

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O fator pluviosidade apresentou o maior peso relativo na avaliação da fragilidade ambiental (47,05%), resultado esperado em função de sua atuação direta como agente desencadeador dos processos morfodinâmicos. A precipitação, ao incidir sobre superfícies mais ou menos protegidas, condiciona o comportamento do escoamento superficial, podendo intensificar a remoção de partículas e a mobilização de sedimentos quando associada a características físicas mais sensíveis, como declividades acentuadas e usos da terra que expõem o solo.

A declividade do terreno configurou o segundo fator mais relevante (20,70%), corroborando evidências já destacadas por França (2018) e Matos (2020), que observaram sua forte correlação com processos erosivos, movimentos gravitacionais de massa e aumento da velocidade do escoamento. Terrenos mais inclinados tendem a reduzir o tempo de contato da água com o solo, aumentando o transporte de sedimentos e a instabilidade das vertentes.

O uso e ocupação da terra, com peso intermediário (17,94%), atua como um modulador dos processos de degradação, podendo intensificar ou minimizar a suscetibilidade ambiental. Conforme discutido por Traficante (2016), o uso e ocupação é dos fatores que se destacam quando ponderados de acordo com a sua importância frente à fragilidade ambiental. A forma como o território é manejado determina o grau de exposição dos solos, influenciando diretamente a resposta da paisagem às chuvas e ao relevo. Assim, o uso da terra se destaca como variável condicionante das consequências antrópicas na dinâmica erosiva.

Embora o solo seja o elemento diretamente afetado pela erosão, seu peso de influência foi relativamente menor no presente estudo (9,70%). Tal resultado pode ser atribuído ao fato de que a vulnerabilidade dos solos se manifesta com maior intensidade quando associada à ação conjunta de outros fatores, como precipitação

elevada, uso inadequado e declividades significativas, os quais operam como vetores que potencializam sua suscetibilidade.

A geologia, por sua vez, representou o menor peso percentual na análise AHP (4,60%). Apesar de constituírem a base estrutural dos demais componentes, trata-se de um fator com comportamento predominantemente mais estático, exercendo influência indireta sobre os processos erosivos quando comparado às variáveis mais dinâmicas do sistema ambiental.

Posteriormente, foi realizado o cálculo do autovalor principal ($\lambda_{\text{máx}}$), obtido a partir do produto entre a matriz de comparação e o vetor de prioridades. O valor encontrado foi de 5,10, muito próximo ao número de critérios considerados ($n = 5$). A partir desse resultado, calculou-se o Índice de Consistência (IC), aplicando a fórmula de Saaty (2005):

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} = \frac{5,10 - 5}{5 - 1} = 0,026 \quad (1)$$

Para avaliar a aceitabilidade desse valor, utilizou-se a Razão de Consistência (RC), definida pela razão entre o IC e o Índice Randômico (IR). De acordo com a Tabela de Saaty (2005), o valor de IR para matrizes de ordem 5 é de 1,12, resultando em:

$$RC = \frac{IC}{IR} = \frac{0,026}{1,12} = 0,023 \quad (2)$$

Os pesos finais atribuídos a cada fator revelaram que a pluviometria se apresentou como o critério mais relevante (47,5%), reforçando seu papel como principal agente desencadeador de processos erosivos e de degradação ambiental. A declividade foi o segundo fator em importância (20,7%), refletindo sua contribuição na aceleração do escoamento superficial e no aumento do potencial erosivo. O uso da terra recebeu peso de 17,9%, evidenciando a influência da ação antrópica como principal modeladora da fragilidade nos sistemas atuais. Já a pedologia, com 9,7%, expressa a resistência intrínseca dos diferentes solos, ainda que menos determinante do que os fatores dinâmicos. Por fim, a geologia foi considerada o fator de menor peso

(4,6%), dado que seus efeitos já se manifestam indiretamente por meio da formação dos solos e das formas do relevo.

De modo geral, os resultados confirmam que a fragilidade ambiental da BHRP, obtida neste estudo, é resultado da interação entre condições naturais, sobretudo climáticas e geomorfológicas e sob a influência das formas de uso da terra. Os pesos obtidos pelo AHP foram integrados nos fatores, permitindo a geração do mapa final de fragilidade ambiental.

5.2.2 Mapa de fragilidade ambiental da bacia

A análise da fragilidade ambiental emergente constitui um instrumento essencial para compreender a dinâmica dos ambientes naturais e orientar estratégias de planejamento territorial. Conforme destacam Spörl e Ross (2004), a identificação das fragilidades potenciais e emergentes permite estabelecer diretrizes mais adequadas de ocupação do espaço físico, fornecendo subsídios técnicos ao zoneamento e à gestão ambiental. Nesse sentido, a integração de variáveis físicas e bióticas em um mesmo modelo possibilita uma leitura sistêmica do território, evidenciando áreas mais suscetíveis e contribuindo para políticas públicas voltadas ao uso sustentável dos recursos naturais.

Assim sendo, a integração dos fatores ambientais foi realizada por meio da álgebra de mapas, empregando a calculadora raster do QGIS. Esse procedimento consistiu em aplicar os pesos derivados do (AHP) a cada camada padronizada, resultando em uma equação ponderada que expressa a fragilidade ambiental emergentes da bacia. A formulação aplicada foi:

$$F = (Pl * 0.471) + (De * 0.207) + (Uso * 0.179) + (So * 0.097) + (Ge * 0.046) \quad (3)$$

Em que:

F = fragilidade ambiental emergente;

Pl = fragilidade quanto à pluviosidade;

De = fragilidade quanto à declividade do terreno;

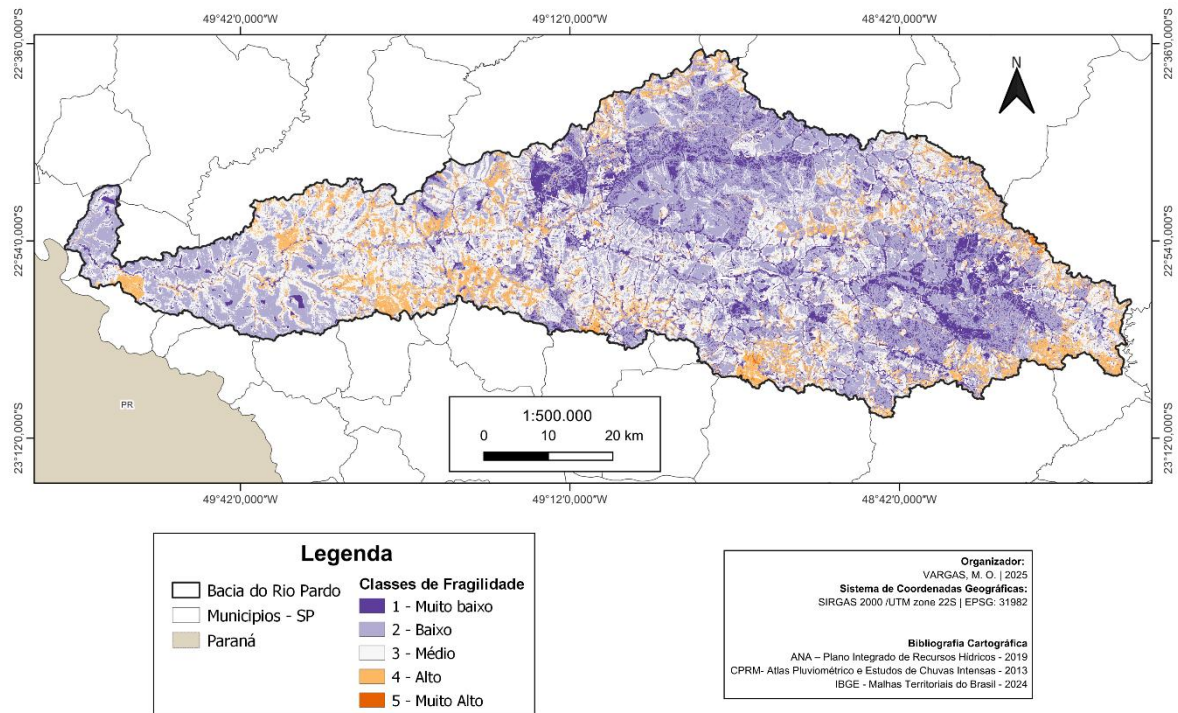
Uso = fragilidade quanto ao uso e ocupação;

So = fragilidade quanto às classes de solos;

Ge = fragilidade quanto à geologia.

Essa operação possibilitou integrar, de forma especializada, a contribuição relativa de cada fator para a fragilidade ambiental emergente, resultando em um mapa-síntese representativo do potencial de vulnerabilidade da BHRP (Figura 21).

Figura 21. Mapa de fragilidade ambiental emergente da BHRP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os resultados evidenciaram que a maior parte da bacia se enquadra nas classes de fragilidade baixa (40,58%) e média (35,92%), totalizando aproximadamente 76,5% da área (Tabela 25). As áreas classificadas como de fragilidade alta correspondem a 10,99% do território, geralmente associadas a setores de maior declividade ou a usos mais intensivos da terra. A classe de fragilidade muito baixa representa 12,35% da bacia, enquanto a fragilidade muito alta apresentou a menor representatividade espacial, com apenas 0,16% da área.

Tabela 25. Fragilidade ambiental da BHRP.

Fragilidade		Área do mapa	
Nota	Classe	km ²	%
1	Muito baixa	593,37	12,35%
2	Baixa	1950,18	40,58%
3	Média	1726,49	35,92%
4	Alta	528,02	10,99%
5	Muito alta	7,81	0,16%
Área total		4805,88	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.3 Fragilidade ambiental, manejo e planejamento territorial na BHRP

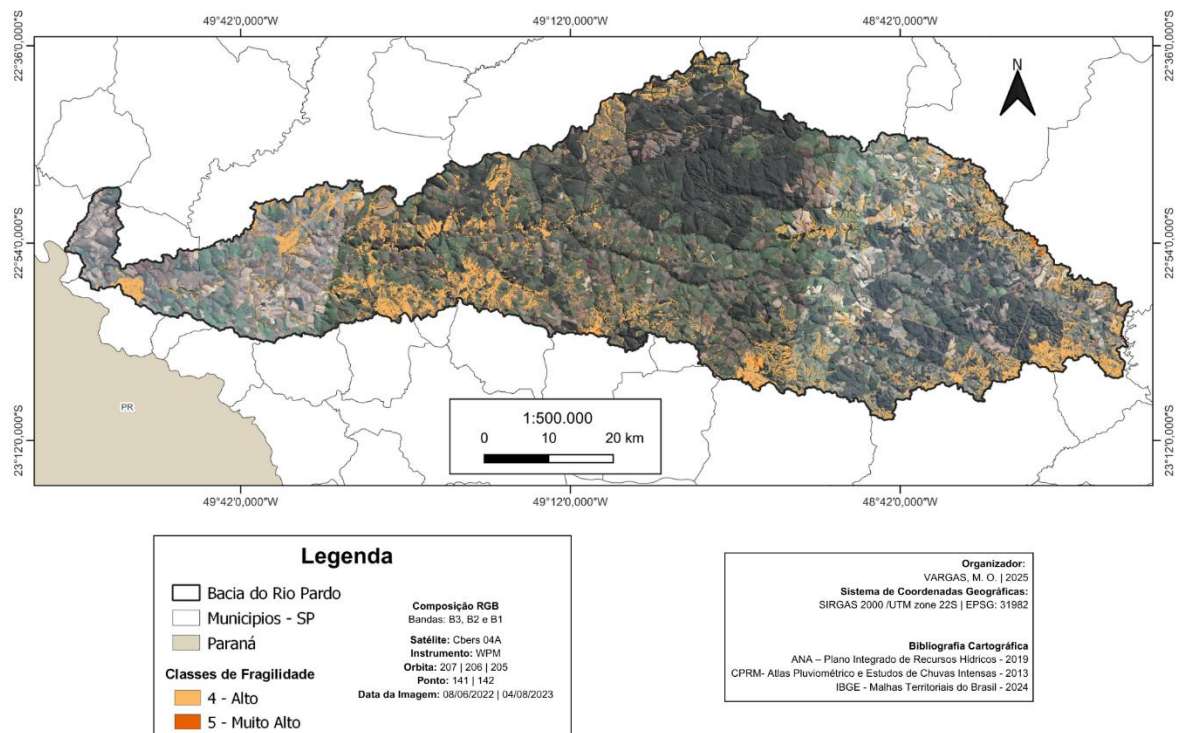
Os resultados do mapeamento da fragilidade ambiental da BHRP permitiram identificar áreas com maior suscetibilidade à ocorrência de processos degradacionais, correlacionados particularmente à erosão e ao assoreamento, que influenciam diretamente a disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos. A fragilidade ambiental, conforme enfatizado por França (2018), manifesta-se a partir da relação entre os atributos naturais do meio físico e a proteção conferida pela cobertura vegetal. Assim, ambientes onde a vegetação é removida ou substituída por usos intensivos, especialmente agrícolas ou urbanos, apresentam tendência à instabilidade emergente, uma vez que os processos morfodinâmicos passam a prevalecer sobre os pedogenéticos, como destacado por Crepani et al. (2001).

Na BHRP, observou-se que a pressão antrópica, decorrente da expansão agropecuária e do crescimento urbano, intensifica os efeitos da declividade e da suscetibilidade natural dos solos, resultando em setores com elevada fragilidade que demandam atenção prioritária do planejamento ambiental. Tal situação é mais evidente na porção a montante da bacia, que abrange principalmente os municípios de Pardinho, Botucatu, Pratânia e Itatinga, onde se localizam áreas de recarga hídrica e trechos de maior altitude associados às cabeceiras do Rio Pardo e de seus principais afluentes.

Nessa região, as formas de relevo variam de onduladas a fortemente onduladas, o que naturalmente favorece o escoamento superficial e aumenta o risco de instabilidade das vertentes quando há perda de cobertura vegetal. Sobre essas

áreas, destaca-se a presença de Argissolos Vermelho-Amarelos, Nitossolos Vermelhos e Neossolos Litólicos. Soma-se a isso a expansão de práticas agrícolas intensivas, como as lavouras de soja e de cana-de-açúcar, e de áreas de uso agrícola em mosaico, dinâmica que intensifica a fragilidade local ao reduzir a proteção do solo e aumentar a exposição das vertentes. Como resultado dessa combinação de declividades mais acentuadas e pressões antrópicas contínuas, essa região concentra grande parte das áreas classificadas com fragilidade alta e muito alta, tornando o solo mais suscetível à erosão (Figura 22).

Figura 22. Mapa de fragilidade alta e muito alta da BHRP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Como a cobertura vegetal desempenha papel essencial na proteção do solo contra os efeitos diretos da precipitação e no controle do escoamento superficial, sua supressão intensifica significativamente os riscos de degradação. Nesse sentido, Crepani et al. (2001) afirmam que, ao atuar como elemento estabilizador das vertentes, a vegetação densa reduz a energia das chuvas e favorece a infiltração da água no solo.

Esse entendimento é reforçado por Matos (2020), ao demonstrar que áreas com cobertura florestal contínua e presença de serapilheira apresentam escoamento

superficial consideravelmente menor devido à interceptação foliar. Consequentemente, a remoção de vegetação nas zonas declivosas a montante da BHRP implica maior aporte de sedimentos aos cursos d'água, além de comprometer a recarga dos aquíferos e a regularização das vazões a jusante, tornando tais áreas o ponto mais sensível da bacia sob a perspectiva da segurança hídrica.

Embora as porções centrais e a jusante da BHRP apresentem menor fragilidade natural devido ao relevo menos acidentado, municípios como Avaré, São Manuel, Santa Cruz do Rio Pardo e Ourinhos evidenciam fragilidade emergente resultante da urbanização acelerada e pouco planejada. A impermeabilização crescente dos solos urbanos, associada à canalização da drenagem pluvial e à ocupação de margens de rios e áreas de várzea, intensifica picos de vazão e acelera o transporte de sedimentos, além de ampliar o risco de inundações e de processos erosivos lineares urbanos (Tucci, 2005). Dessa forma, mesmo áreas classificadas com baixa a média fragilidade natural podem atingir níveis críticos de risco quando expostas a usos inadequados da terra, demonstrando que a fragilidade ambiental deve ser interpretada não apenas como atributo físico, mas como indicador integrado de risco hídrico.

Os resultados obtidos e a literatura confirmam a existência de uma correlação direta entre a combinação da declividade, o uso inadequado com perda de cobertura vegetal e o desencadeamento de processos de erosão, assoreamento e instabilidade das vazões nos sistemas hídricos da BHRP. Quando o solo é removido ou transportado, ocorre perda direta do volume de armazenamento hídrico dos canais fluviais, uma vez que o sedimento acumulado passa a ocupar o espaço destinado à água. Tal problemática reflete-se na degradação de nascentes, no aumento da turbidez, na redução da profundidade dos corpos d'água e na consequente elevação dos custos associados ao tratamento para abastecimento humano em municípios localizados a jusante na bacia, como Ourinhos.

Nesse contexto, tornam-se essenciais ações de manejo compatíveis com as especificidades territoriais da bacia. Com base nas diretrizes de manejo propostas por Piroli (2016; 2022; 2023), apresentam-se recomendações para diferentes cenários. Em áreas de nascentes e porções a montante, recomenda-se: a recomposição da vegetação nas zonas de recarga; a recuperação florestal em Áreas de Preservação Permanente (APPs); a adoção de sistemas agroflorestais e silvipastoris adaptados

aos declives; o banimento do preparo convencional do solo em áreas críticas; e o controle de estradas rurais e da drenagem superficial.

Nas áreas agrícolas intermediárias, indica-se o plantio direto, a rotação de culturas, o terraceamento em nível e o manejo adequado de pastagens degradadas, de modo a reduzir as perdas de solo e aumentar a infiltração. Já nas áreas urbanizadas, medidas como a pavimentação e calçadas permeáveis, a implantação de parques lineares e faixas de proteção em margens fluviais, a criação de reservatórios de retenção e jardins de chuva, bem como a regularização das redes de esgoto e drenagem pluvial, podem contribuir para a reversão da pressão exercida sobre os cursos d'água (Piroli, 2016; 2022; 2023).

Tais diretrizes reafirmam que a gestão das fragilidades ambientais na BHRP não pode ser tratada de forma isolada por cada município, pois os processos hidrológicos e geomorfológicos não reconhecem limites administrativos. A superação dos desafios identificados requer cooperação multiescalar e instrumentos de planejamento orientados por informações geoespaciais consistentes

5.4 Atlas digital de fragilidade ambiental da BHRP

A concepção de um atlas, segundo Nogueira (2006), está vinculada à delimitação de uma área geográfica específica, como uma bacia hidrográfica, município, região ou país e à escolha de uma temática definida em função do público-alvo. Assim, um mesmo espaço pode originar diferentes tipos de atlas, com enfoques voltados ao ensino escolar, à pesquisa científica ou ao planejamento urbano e ambiental, de acordo com as necessidades dos usuários. Em todos os casos, o atlas deve reunir informações organizadas de modo a atender tanto especialistas quanto o público em geral, constituindo-se em uma ferramenta estratégica de representação e interpretação do território.

Nesse contexto, embora a análise da fragilidade ambiental deste estudo tenha adotado a bacia hidrográfica como unidade de referência, reconhece-se que a sobreposição de seus limites aos territórios municipais amplia a aplicabilidade prática dos resultados. Enquanto as tabelas e mapas discutidos no relatório concentram-se nos dados restritos à área interna da bacia, o Atlas Digital de Fragilidade Ambiental foi estruturado para também incluir recortes municipais. Essa abordagem possibilita que

gestores locais visualizem as condições específicas de seus territórios, fortalecendo o uso do material em processos de planejamento e tomada de decisão.

Adicionalmente, para a elaboração de um atlas que abrange área superior ao limite estrito da bacia, alguns ajustes de padronização foram necessários, especialmente nas classes de solos e rochas, a fim de contemplar elementos adicionais que não estavam presentes no recorte hidrográfico (Tabela 26 e 27).

Tabela 26. Notas e classes de fragilidade atribuídas ao fator solo de todos os municípios da bacia.

Classes de Solos	Fragilidade	
	Nota	Classe
LV21 - Latossolos Vermelhos e LVA6 - Latossolos Vermelho-Amarelos	1	Muito baixa
-	2	Baixa
NV15 - Nitossolos Vermelhos, PV12- Argissolos Vermelhos e PVA14 - Argissolos Vermelho-Amarelos	3	Média
-	4	Alta
Área Urbana, GX11 - Gleissolos Háplicos, RQ3 - Neossolos Quartzarênicos e RL10 - Neossolos Litólicos	5	Muito alta

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 27. Notas e classes de fragilidade atribuídas ao fator geologia de todos os municípios da bacia.

Unidade Litoestratigráfica	Fragilidade	
	Nota	Classe
-	1	Muito baixa
K1_beta_sg - Serra Geral, Grupo São Bento	2	Baixa
-	3	Média
J3K1bt - Botucatu	4	Alta
K2m - Marília e Q2a - Depósitos aluvionares, P3t - Teresina e P3T1p PiramboiaK2vp - Vale do Rio do Peixe.	5	Muito alta

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O Atlas Digital reúne mapas temáticos, tabelas, gráficos e textos explicativos, estruturados em dois níveis de consulta, um sobre a visão geral da bacia hidrográfica e outro sobre o detalhamento por município. Essa organização favorece leituras multiescalares e a interpretação integrada dos fatores ambientais que contribuem para a fragilidade territorial.

O produto final foi disponibilizado em três formatos complementares:

- (i) Um site que integra todo o conteúdo do atlas e facilita o acesso às informações.
- (ii) Um aplicativo interativo no Google Earth Engine, que permite a exploração dos dados sobre a fragilidade sobre o meio.
- (iii) Um atlas disponível para download, diagramado no Canva, com layout padronizado e foco na comunicação visual dos resultados.

Dessa forma, o Atlas da Fragilidade do Rio Pardo se consolida como uma ferramenta estratégica para subsidiar ações de ordenamento territorial e uso sustentável dos recursos naturais na bacia, contribuindo com a segurança hídrica e a gestão ambiental regional. O acesso ao site do atlas encontra-se disponibilizado no Apêndice desta dissertação.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao longo deste estudo demonstram que a BHRP apresenta uma condição ambiental marcada pela predominância de fragilidade baixa (40,58%) e média (35,92%), que juntas representam aproximadamente 76,5% da área total. Essa configuração indica que grande parte da bacia se encontra em relativo equilíbrio, desde que mantidas as condições adequadas de cobertura vegetal e de manejo do solo. Destaca-se também a classe de fragilidade muito baixa, que abrange 12,35% do território e atua como importante zona de estabilidade natural. No entanto, uma parcela significativa da bacia (10,99%) foi classificada com fragilidade alta, refletindo a influência de fatores condicionantes como declividade acentuada, perda de cobertura vegetal e intensificação produtiva nos setores rurais e de expansão urbana. Por fim, embora a classe de fragilidade muito alta (0,16%) seja pouco expressiva espacialmente, ela exige atenção rigorosa e ações mitigatórias prioritárias, assumindo um papel crítico e estratégico para a manutenção da estabilidade hidrológica e ecológica de toda a bacia.

A análise demonstrou que áreas de nascentes e zonas de recarga localizadas na porção montante são particularmente sensíveis e requerem atenção prioritária do ponto de vista do planejamento ambiental. Nesses setores, a conjugação de relevo mais ondulado e prática agrícolas intensivas, contribui para a elevação dos índices de fragilidade. Tal dinâmica amplia o risco de processos degradacionais que, uma vez desencadeados, tendem a impactar negativamente a regularização de vazões e a qualidade dos recursos hídricos em toda a bacia.

No contexto urbano, os resultados permitiram identificar áreas de fragilidade emergente nos municípios de maior porte, como Avaré e Ourinhos. Nessas localidades, a impermeabilização do solo, a ocupação inadequada de margens de rios contribui para episódios de enxurradas, erosão acelerada e assoreamento de corpos d'água, ampliando a vulnerabilidade socioambiental. Portanto, mesmo onde a fragilidade natural é baixa ou média, a pressão antrópica é capaz de elevar o risco ambiental a níveis críticos para a gestão hídrica.

A utilização de SIG integrada ao método AHP demonstrou-se eficaz para a análise multicritério adotada. O procedimento possibilitou a atribuição de pesos aos fatores ambientais e facilitou a aplicação da Combinação Linear Ponderada, resultando em uma representação espacial com os processos físicos observados. A

metodologia adotada confirma seu potencial de aplicação em diagnósticos territoriais simples voltados à gestão de bacias hidrográficas.

A literatura internacional mais recente destaca ainda a tendência de incorporação de abordagens híbridas ao AHP, como o Fuzzy AHP, visando reduzir a imprecisão dos julgamentos humanos por meio da lógica fuzzy, o que amplia sua precisão e confiabilidade preditiva em estudos ambientais com grande complexidade e incerteza (Madal, Prakash e Mondal 2025). Ainda que tal evolução metodológica se apresente como caminho promissor, reforça-se que o AHP convencional permanece uma técnica amplamente utilizada, sobretudo pela simplicidade operacional e pela robustez dos resultados quando a RC indica consistência aceitável.

Como produto, a elaboração do atlas digital de fragilidade ambiental da BHRP contribui para a democratização das informações ambientais, fornecendo suporte prático aos gestores municipais, técnicos e tomadores de decisão. Além disso, fortalece o vínculo entre conhecimento científico, planejamento regional e ações educativas, ampliando as condições para mitigação e prevenção de impactos.

Nesse sentido, os produtos gerados nesta pesquisa convergem para os compromissos da Agenda 2030, atendendo diretamente ao ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ao fornecer bases técnicas para a gestão integrada dos recursos hídricos na BHRP (Meta 6.5). Adicionalmente, o mapeamento das áreas críticas de fragilidade corrobora com o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), especificamente a Meta 11.5, ao instrumentalizar o planejamento territorial para a redução de vulnerabilidades e perdas causadas por desastres relacionados à água, como processos erosivos e inundações em municípios como Ourinhos e Avaré.

Conclui-se, portanto, que os resultados obtidos, evidenciam conexões diretas entre fragilidade ambiental e segurança hídrica, reforçam a importância de ações preventivas nas áreas a montante e de controle do uso da terra em áreas urbanizadas. Demonstram também que a bacia depende de manejo integrado, com cooperação entre municípios e setores produtivos e oferecem instrumentos técnicos para subsidiar políticas públicas de conservação, recuperação e uso sustentável do território.

REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, Aziz Nacib; MÜLLER-PLANTENBERG, Clarita. **Previsão de impactos**: o estudo de impacto ambiental no leste, oeste e sul: experiências no Brasil, na Rússia e na Alemanha. São Paulo: Edusp, 2002.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos Paranapanema**. Brasília, DF: ANA, 2015. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/45d66f15-0605-4167-ac08-b24a6cdc2879>. Acesso em: 28 ago. 2025.

ANJINHO, Phelipe da Silva et al. Environmental fragility analysis in reservoir drainage basin land use planning: A Brazilian basin case study. **Land Use Policy**, [S. l.], v. 100, p. 104946, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104946>. Acesso em: 18 nov. 2025.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidência da República, 1988.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

CÂMARA, Gilberto; MEDEIROS, J. S. de. Princípios básicos em geoprocessamento. **Sistemas de Informações Geográficas**: aplicações na agricultura, [S. l.], v. 2, p. 3-11, 1998.

CANVA. **Canva**: ferramenta de design gráfico online. Sydney: Canva Pty Ltd., 2013. Disponível em: <https://www.canva.com/>. Acesso em: 21 ago. 2025.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO MÉDIO PARANAPANEMA (CBH-MP). **Plano de bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Médio Paranapanema (UGRHI-17)**. São Paulo: CBH-MP, 2017.

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

DAS, Uttam; BEHERA, Bhagirath. Geospatial assessment of ecological vulnerability of fragile Eastern Duars Forest integrating GIS-based AHP, CRITIC and AHP-TOPSIS models. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, [S. l.], v. 15, n. 1, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2330529>. Acesso em: 18 nov. 2025.

DONADIO, Nicole M. M.; GALBIATTI, João A.; PAULA, Rinaldo C. de. Qualidade da água de nascentes com diferentes usos do solo na bacia hidrográfica do Córrego Rico, São Paulo, Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 115-125, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula da 10ª Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1979. 83 p.

FAN, Fernando Mainardi et al. Sobre o início da rede de drenagem definida a partir dos modelos digitais de elevação. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 241-257, jul./set. 2013.

FITZ, Paulo Roberto. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 160 p.

FRANÇA, Luciano Cavalcante de Jesus. **Fragilidade Ambiental Potencial da Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil**. 2018. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2018.

FRANÇA, Luciano Cavalcante de Jesus et al. Environmental Fragility Zoning Using GIS and AHP Modeling: Perspectives for the Conservation of Natural Ecosystems in Brazil. **Conservation**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 349-366, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/conservation2020024>. Acesso em: 18 nov. 2025.

GEIST, Helmut J.; LAMBIN, Eric F. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation: Tropical forests are disappearing as the result of many pressures, both local and regional, acting in various combinations in different geographical locations. **BioScience**, [S. l.], v. 52, n. 2, p. 143-150, 2002.

GOOGLE. **Google Sites**. Mountain View: Google LLC, 2008. Disponível em: <https://sites.google.com>. Acesso em: 21 ago. 2025.

GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 202, p. 18–27, 2017.

HORTON, Robert. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, [S. l.], v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022: panorama**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Malhas territoriais**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 24 ago. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de clima do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Câmeras imageadoras – CBERS-3/4**. Brasília, DF: INPE, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/pt-br/programas/cbers/sobre-o-cbers-1/cbers-3-e-4/cameras-imageadoras>. Acesso em: 28 ago. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Catálogo de imagens**. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>. Acesso em: 28 ago. 2025.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). **ALOS Global Digital Surface Model (DSM) “ALOS World 3D-30m” (AW3D30) Ver.3.2/3.1 Product Description**. Tsukuba: Earth Observation Research Center (EORC), 2021.

KAMUSOKO, C.; ANIYA, M. Land use/cover change and landscape fragmentation analysis in the Bindura District, Zimbabwe. **Land Degradation & Development**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 221-233, 2007.

KRONKA, Francisco J. N. et al. **Inventário florestal da vegetação natural do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente / Instituto Florestal, 2005.

LAUDAN, Rachel. **From Mineralogy to Geology: The Foundations of Science, 1650-1830**. Chicago: The University of Chicago Press, 1993.

LIMA, Fernanda Imada de. **Estudo geoambiental de bacias hidrográficas utilizando o modelo PER no município de São Carlos (SP)**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

LIMA, Geisiane Aparecida de et al. Bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão: estudo de caso Ribeirão Isidoro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 7., 2016, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: IBEAS, 2016.

MALCZEWSKI, Jacek. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. **Progress in Planning**, [S. l.], v. 62, n. 1, p. 3-65, 2004.

MALCZEWSKI, Jacek. Local Weighted Linear Combination. **Transactions in GIS**, [S. l.], v. 15, n. 4, p. 439–455, 2011.

MANDAL, Bhaskar; GOSWAMI, Kaushalendra Prakash; MONDAL, Sharmistha. Modelling environmental fragility in an industrial landscape: An integrated remote sensing–GIS framework for sustainable planning in Brahmani–Dwarka Interfluve. **Geosystems and Geoenvironment**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 100460, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2025.100460>. Acesso em: 18 nov. 2025.

MATOS, Ana Carolina Martins. **Identificação da fragilidade ambiental potencial através de análise multicritérios e técnicas de geoprocessamento: município de Patos de Minas/MG**. 2020. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2020.

MIRANDA, José Iguelmar. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2010.

MIRANDA, Ricardo Augusto Calheiro de; OLIVEIRA, Marcus Vinicius Siqueira de; SILVA, Danielle Ferreira da. Ciclo hidrográfico planetário: abordagens e conceitos. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 21, p. 109-119, 2010.

MORALES, Milton Vinícius; VALENTE, Roberta Aversa. Mapping environmental fragility in human-modified landscapes using fuzzy logic and continuous data spatialization. **Journal for Nature Conservation**, [S. l.], v. 86, p. 126932, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2025.126932>. Acesso em: 18 nov. 2025.

MORGAN, Royston Philip Charles. **Soil erosion and conservation**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2009.
NOGUEIRA, R. E. **Cartografia**: representação, comunicação e visualização de dados espaciais. 1. ed. rev. e ampl. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2006.

NOVAIS, Giuliano Tostes. **Classificação climática aplicada ao Bioma Cerrado**. 2019. 184 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.1e.2019.2199>.

NOVO, Evlyn L. de Moraes. **Sensoriamento remoto**: princípios e aplicações. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. [S. l.]: ONU Brasil, 2022. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/>. Acesso em: 21 nov. 2023.

PADILHA, D. G.; TREVISAN, M. L.; CRUZ, J. C. Sensibilidade do modelo de fragilidades ambientais à ponderação multicriterial: aspectos físicos da bacia hidrográfica do Alto Uruguai. **Floresta**, Curitiba, v. 44, n. 3, p. 535-548, 2014.

PAUTZ, C. et al. Mapping the environmental vulnerability of a lagoon using fuzzy logic and the AHP method. **Water**, [S. l.], v. 15, n. 11, p. 2102, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15112102>.

PERROTTA, Mônica Mazzini et al. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**, escala 1:750.000. Programa Geologia do Brasil - PGB. São Paulo: CPRM, 2006.

PIROLI, Edson Luís. **Geoprocessamento na determinação da capacidade e avaliação do uso da terra do município de Botucatu-SP**. 2002. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

PIROLI, Edson Luís. **Geoprocessamento aplicado ao estudo do uso da terra das áreas de preservação permanente dos corpos d'água da bacia hidrográfica do Rio Pardo**. 2013. Tese (Livre-Docência) – Universidade Estadual Paulista, Ourinhos, 2013.

PIROLI, Edson Luís. **Água**: por uma nova relação. Jundiaí: Paco Editorial, 2016.

PIROLI, Edson Luís. **Água e bacias hidrográficas**: planejamento, gestão e manejo para enfrentamento das crises hídricas. São Paulo: Editora Unesp, 2022.

PIROLI, Edson Luís. **Manejo integrado de bacias hidrográficas para produção de água**: exercícios aplicados ao Rio Pardo. São Paulo: Editora Unesp, 2023.

PORTO, Monica F. A.; PORTO, Rubem La Laina. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 43–60, 2008. Disponível em: <https://revistas.usp.br/eav/article/view/10292>. Acesso em: 27 ago. 2025.

QUANTUM GIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS**: versão 3.28.11. [S. l.]: QGIS Development Team, 2025. Disponível em: <http://www.qgis.org>. Acesso em: 27 ago. 2025.

QUEIROZ NETO, José Pereira de. Pedologia: conceito, método e aplicações. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 3, p. 95–102, 2011. DOI: 10.7154/RDG.1984.0003.0006. Disponível em: <https://revistas.usp.br/rdg/article/view/47088>. Acesso em: 29 ago. 2025.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1995.

RIBEIRO, Fernanda Leite et al. Fisiografia da microbacia do Ribeirão Coqueiro—Jataizinho, PR, obtida por meio de técnicas de geoprocessamento. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 8, n. 2, p. 7-18, 2015.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 8, p. 63-74, 1994.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Landforms and environmental planning: potentialities and fragilities. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. especial, p. 38-51, 2012.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches; DEL PRETTE, Marcos Estevan. Recursos hídricos e as bacias hidrográficas: âncoras do planejamento e gestão ambiental. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 12, p. 89–121, 2011. DOI: 10.7154/RDG.1998.0012.0005. Disponível em: <https://revistas.usp.br/rdg/article/view/53736>. Acesso em: 27 ago. 2025.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches; MOROZ, Isabel Cristina. Mapa geomorfológico do estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 10, p. 41-58, 1996.

ROSSI, M. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. v. 1, 118 p.

SAATY, Thomas L. **The analytic hierarchy process**: planning, priority setting, resource allocation. New York: McGraw-Hill International, 1980.

SAATY, Thomas L. **Theory and applications of the analytic network process**: decision making with benefits, opportunities, costs, and risks. Pittsburgh: RWS Publications, 2005.

SANTOS, H. G. dos et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2025. 393 p.

SANTOS, Luciano Ferreira dos; CRUZ, Rafael Barreto Castelo da. O uso do método AHP na tomada de decisão para seleção de lajes de edifícios comerciais. **Engenharia, Estudo e Pesquisa ABPE**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 39-52, 2013.

SÃO PAULO (Estado). Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). **Banco de Dados Hidrológicos**. São Paulo: DAEE, 2025. Disponível em: <https://hidrologia.spaguas.sp.gov.br/Default.aspx?dadosorigem=Pluviom%C3%A9tricos&ugrhi>. Acesso em: 18 nov. 2025.

SOUZA, C. M. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian Biomes with Landsat archive and Earth engine. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 12, n. 17, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>. Acesso em: 22 ago. 2025.

SPÖRL, Christiane; ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 39–49, 2004. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geousp.2004.123868. Disponível em: <https://revistas.usp.br/geousp/article/view/123868>. Acesso em: 29 ago. 2025.

TRAFICANTE, Daniela Polizeli. **Fragilidade ambiental da APA Corumbataí-Botucatu-Tejupá (perímetro Botucatu, SP, Brasil) na bacia hidrográfica do Rio Capivara**. 2016. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.

TRAFICANTE, Daniela Polizeli et al. Fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Capivara, Botucatu-SP. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 32, n. 1, p. 88–95, 2017. DOI: 10.17224/EnergAgric.2017v32n1p88-95. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/2335>. Acesso em: 28 ago. 2025.

TUCCI, Carlos E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2005.

TUCCI, Carlos E. M.; BERTONI, Juan Carlos. **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TUNDISI, José Galizia. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 55, n. 4, p. 31-33, 2003.

APÊNDICE – ATLAS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DA BHRP

O Atlas Digital de Fragilidade Ambiental da (BHRP) constitui um produto técnico disponível em ambiente web que integra mapas temáticos, gráficos, tabelas explicativas e funcionalidades interativas destinadas à visualização e compreensão dos graus de fragilidade ambiental na bacia. Elaborado a partir dos dados geoespaciais e análises desenvolvidas no estudo, o atlas tem por objetivo facilitar o acesso aos resultados, apoiar o planejamento territorial e orientar gestores públicos, técnicos e comunidade escolar.

Link de acesso: <https://sites.google.com/view/fragilidadedoriopardo/>