

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

VULNERABILIDADE AMBIENTAL DA MICROBACIA HIDROGRÁFICA DE
MANANCIAL DO CÓRREGO RICO

GABRIEL TERRA LAUDINO

Jaboticabal - SP

2º/2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

VULNERABILIDADE AMBIENTAL DA MICROBACIA HIDROGRÁFICA DE
MANANCIAL DO CÓRREGO RICO

GABRIEL TERRA LAUDINO

Orientadora: Profa. Dra. Teresa Cristina
Tarlé Pissarra

Coorientador: Felipe Del Massa Martins

Trabalho apresentado à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias UNESP, Câmpus de
Jaboticabal, para graduação em ENGENHARIA
AGRONÔMICA.

Jaboticabal - SP

2º/2025

L371v

Laudino, Gabriel Terra

Vulnerabilidade ambiental da microbacia hidrográfica de manancial do
Córrego Rico / Gabriel Terra Laudino. -- Jaboticabal, 2025

27 p. : tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias, Jaboticabal

Orientadora: Teresa Cristina Tarlé Pissarra

Coorientador: Felipe Del Massa Martins

1. Bacia Hidrográfica. 2. Vulnerabilidade ambiental. 3. Área de manancial. 4.
Uso do solo. 5. Conservação do solo. I. Título.



GABRIEL TERRA LAUDINO

**VULNERABILIDADE AMBIENTAL DA MICROBACIA HIDROGRÁFICA DE
MANANCIAL DO CÓRREGO RICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof.^a. Dr.^a. Teresa Cristina Tarlé Pissarra

Coorientador: Me. Felipe Del Massa Martins

Área de Concentração: Geomática; Engenharia de água e solo

Data da defesa: 19 / 08 / 2025

(X) Aprovado

() Reprovado

Banca Examinadora:

gouv.br Documento assinado digitalmente
TERESA CRISTINA TARLE PISSARRA
Data: 24/08/2025 21:09:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a. Dr.^a. Teresa Cristina Tarlé Pissarra

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

gouv.br Documento assinado digitalmente
ANILDO MONTEIRO CALDAS
Data: 19/08/2025 11:32:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Anildo Monteiro Caldas

UFRPE - Universidade Federal Rural de Pernambuco

gouv.br Documento assinado digitalmente
DANIEL CARLOS MACHADO
Data: 19/08/2025 11:24:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Daniel Carlos Machado

Doutorando no Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo) – UNESP/FCAV

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em:

26 / 08 / 2025 *ad referendum

Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti
Chefe do Departamento de Engenharia

DEDICATÓRIA

À minha família, que sempre me apoiou com amor, fé e incentivo, mesmo nos momentos mais desafiadores. À República A Casa-Lar, verdadeiro lar durante os anos de graduação, pela convivência, amizade e pelos aprendizados que vão além da sala de aula. Ofereço também este trabalho a todos que acreditam na educação como ferramenta de transformação individual e coletiva.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pela força e sabedoria ao longo desta jornada. À minha orientadora, Profa. Teresa Cristina Tarlé Pissarra, pela orientação dedicada, paciência e apoio técnico durante a execução deste trabalho. Agradeço aos docentes e servidores da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP, pelo conhecimento transmitido e apoio institucional. Aos colegas de curso, pelas trocas de aprendizado e parceria ao longo da graduação. Um agradecimento especial à minha família, por todo o amor, suporte e incentivo. E à minha república, meu verdadeiro lar durante esses anos, pela convivência fraterna e essencial para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

SUMÁRIO

1. RESUMO	1
2. SUMMARY.....	2
3. INTRODUÇÃO.....	3
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	6
4.1. Vulnerabilidade Ambiental	6
4.2 Uso de Geotecnologias no Monitoramento da Vulnerabilidade Ambiental	9
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
7. CONCLUSÕES.....	23
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	24

LISTA DE IMAGENS

Figura 1-Localização da área de estudo na BHCR, SP.....	11
Figura 2-Regiões hidrológicas da área de manancial da BHCR, SP.....	12
Figura 3-Fluxograma metodológico.....	15
Figura 4-Geologia da área de manancial da BHCR, SP.....	17
Figura 5-Unidade de solo da área de manancial da BHCR, SP.	18
Figura 6-Declividade da área de manancial da BHCR, SP.....	18
Figura 7-Cobertura vegetal e uso atual do solo da área de manancial da BHCR, SP.....	19
Figura 8-Vulnerabilidade ambiental da área de manancial da BHCR, SP.....	20

1. RESUMO

Vulnerabilidade ambiental da microbacia hidrográfica de manancial do córrego Rico

A vulnerabilidade ambiental é uma característica que indica a fragilidade natural do meio ou das relações de conectividade e interdependência dos atributos ambientais com as ações antrópicas. O objetivo deste trabalho foi estimar a vulnerabilidade ambiental na área de manancial da Bacia Hidrográfica do Córrego Rico, importante área de produção de água para o abastecimento público da cidade de Jaboticabal – estado de São Paulo. Como metodologia foram levantadas informações dos atributos: geologia, solo, declividade, uso do solo. Com o cruzamento dos atributos ambientais no software ArcGis, foram elaborados os mapas de vulnerabilidade. Os resultados indicam que as áreas de maior concentração de sistemas de produção vegetal e animal tendem a sofrer menos danos, destacando áreas que possuem declividade amena. O grau de vulnerabilidade foi classificado em: Estável (1,1-2,4); Moderadamente Estável (2,5-3,6); Medianamente Estável/Vulnerável (3,7-4,9); Moderadamente Vulnerável (5,0-6,1); Vulnerável (6,2-7,4). Na área de manancial da bacia hidrográfica do córrego Rico ocorre maior vulnerabilidade na área a montante (nascentes) que apresentam maior elevação. A vulnerabilidade ambiental é um conceito fundamental para o planejamento territorial e a gestão ambiental, pois permite identificar áreas mais suscetíveis à degradação dos recursos naturais, como o solo, a água e a biodiversidade. Seu monitoramento e análise desempenham um papel central na preservação ambiental, no planejamento de infraestrutura e no atendimento às necessidades humanas e econômicas.

Palavras-chave: Fragilidade, processo erosivo natural, política de uso do solo.

2. SUMMARY

Environmental vulnerability of the Córrego Rico hydro spring basins

Environmental vulnerability is a characteristic that indicates the natural fragility of the environment or the connectivity and interdependence of environmental attributes with anthropogenic actions. The objective of this final course project was to estimate environmental vulnerability in the headwaters area of the Córrego Rico River Basin, an important water production area for public supply in the city of Jaboticabal, in the state of São Paulo. The methodology involved gathering information on the following attributes: geology, soil, slope, and land use. By cross-referencing the environmental attributes in ArcGis software, vulnerability maps were created. The results indicate that areas with a higher concentration of plant and animal production systems tend to suffer less damage, highlighting areas with gentle slopes. The degree of vulnerability was classified as: Stable (1.1-2.4); Moderately Stable (2.5-3.6); Moderately Stable/Vulnerable (3.7-4.9); Moderately Vulnerable (5.0-6.1); Vulnerable (6.2-7.4). In the headwaters area of the Rico stream watershed, there is greater vulnerability in the upstream area (springs), which is at a higher elevation. Environmental vulnerability is a fundamental concept for land use planning and environmental management, as it has made it possible to identify areas that are more susceptible to the degradation of natural resources, such as soil, water, and biodiversity. Its monitoring and analysis play a central role in environmental preservation, infrastructure planning, and meeting human and economic needs.

Keywords: Fragility, natural erosion process, land use policy.

3. INTRODUÇÃO

A vulnerabilidade ambiental em bacias hidrográficas de manancial representa um tema estratégico para a gestão ambiental, especialmente no contexto da segurança hídrica, conservação dos recursos naturais e sustentabilidade dos serviços ecossistêmicos. Bacias de manancial são áreas essenciais para a captação de água destinada ao abastecimento público e, portanto, exigem cuidados especiais com relação ao uso e ocupação do solo, às atividades antrópicas e à conservação dos ecossistemas que garantem a recarga, qualidade e disponibilidade hídrica.

Bacias hidrográficas representam uma unidade fundamental de análise em estudos ambientais (Choudhari et al.). Os serviços ecossistêmicos fornecidos pelas bacias hidrográficas são cruciais para promover o abastecimento sustentável de água, a regulação do clima e habitats de biodiversidade (Avaliação Ecossistêmica do Milênio). Ao integrar essas perspectivas, os estudos de vulnerabilidade de bacias hidrográficas podem se tornar mais detalhados ao considerar aspectos ambientais, incluindo geologia, geomorfologia, relevo, solo, clima e mudanças na cobertura e uso da terra (Chauhan et al.).

O conceito varia na bibliografia científica e é definido como a suscetibilidade de um ambiente sofrer degradação ou perda de suas funções ecológicas diante de pressões naturais ou, principalmente, antrópicas. No contexto de bacias hidrográficas de manancial, essa vulnerabilidade está associada à intensidade do uso do solo (como a implementação de sistemas de produção vegetal, florestal, animal, industrial e urbanização), à fragilidade dos atributos físicos do meio (relevo, solo, clima e cobertura vegetal) e à presença ou ausência de instrumentos de proteção legal e institucional.

As áreas de manancial, em especial, são sensíveis a processos de degradação como a erosão do solo, o assoreamento de corpos d'água, a

contaminação por agroquímicos e efluentes domésticos, e a perda de biodiversidade. Tais impactos comprometem diretamente a capacidade da bacia de armazenar água no sistema e prover água em quantidade e qualidade adequadas. A vulnerabilidade pode ser agravada por fatores como a impermeabilização do solo em áreas urbanas, desmatamento de matas ciliares e expansão agrícola desordenada em zonas de recarga hídrica (YE et al., 2025; FOLEY et al., 2005; COSTANZA et al., 1997).

A avaliação deste processo em bacias hidrográficas envolve a análise integrada de diversos indicadores ambientais, sociais e institucionais. Entre os métodos utilizados, destacam-se a análise multicritério, o uso de geotecnologias (como sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica - SIG) e a modelagem ambiental. Essas ferramentas possibilitam identificar áreas mais sensíveis, diagnosticar ameaças potenciais e subsidiar políticas públicas de conservação, uso do solo e gestão participativa dos recursos hídricos.

A identificação de áreas prioritárias para conservação dentro da bacia, com base em seu grau de vulnerabilidade, permite o direcionamento de ações como o reflorestamento de Áreas de Preservação Permanente (APPs), a recuperação de nascentes, o controle de cargas poluidoras e a implementação de esquemas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). Tais iniciativas, além de mitigar os efeitos da degradação, valorizam os serviços ecossistêmicos reguladores, como a proteção da qualidade da água e a estabilização do clima local.

Por fim, a abordagem da vulnerabilidade ambiental em bacias hidrográficas de manancial deve ser integrada a uma política pública que promova o ordenamento territorial, a educação ambiental, o monitoramento contínuo e o envolvimento das comunidades locais. Essa abordagem sistêmica e participativa é essencial para garantir a resiliência dos mananciais frente às pressões socioeconômicas e aos efeitos das mudanças climáticas, assegurando o uso sustentável e a proteção dos recursos hídricos para as gerações presentes e futuras.

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso foi estimar a vulnerabilidade ambiental na área de manancial da Bacia Hidrográfica do Córrego Rico, importante área de produção de água para o abastecimento público da cidade de Jaboticabal – estado de São Paulo, Brasil.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Vulnerabilidade Ambiental

A vulnerabilidade ambiental é uma característica que indica a fragilidade natural do meio, e o estudo das relações de conectividade e interdependência dos atributos ambientais com as ações antrópicas é de extrema importância para compreender a vulnerabilidade do ecossistema em bacias hidrográficas (TURNER et al., 2003; ADGER, 2006; YE et al., 2025).

Por isso a compreensão da vulnerabilidade do ecossistema de uma bacia hidrográfica visa correlacionar os atributos ambientais na unidade territorial a partir de ferramentas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (Panda et al., 2022; Lira et al., 2025; Belhadj et al., 2025), para estimar as regiões mais naturalmente frágeis e inserir as atividades antrópicas no intuito de indicar a corresponsabilização entre usuários, trabalhadores e gestores.

Os processos de fragilidade ou vulnerabilidade natural na unidade territorial de bacias hidrográficas estão associadas as características do solo, litologia e topografia, principalmente quanto aos aspectos físicos, químicos e biológicos (Pissarra et al., 2021a; Cano-Diaz et al., 2023; Chasia et al., 2024), que ao suportarem uma alteração ou mudança de padrão, contribuem para o desequilíbrio do ecossistema natural de uma forma sistemática. As características de um ecossistema incluem os atributos ambientais. Pois m ecossistema consiste em uma rede complexa de organismos vivos (fatores bióticos) interagindo entre si e com seu ambiente físico (fatores abióticos).

Por isso, para elaborar um planejamento das atividades antrópicas em áreas rurais, percebe-se, no entanto, que é necessário compreender o ambiente físico e adequar às ações que minimizem o impacto negativo ao ecossistema. A preocupação em implementar atividades que considerem os atributos ambientais

das bacias hidrográficas ganha cada vez mais força, o que reforça a importância de implementar as práticas de manejo conservacionistas (Wang et al., 2021; Cano-Díaz et al., 2023).

Uma vez que o tema vulnerabilidade é bastante abrangente e além de considerar a fragilidade do meio físico, químico e biológico do ecossistema, leva em conta aspectos como a geologia, solo, topografia e uso do solo, aliados às dimensões social (visão ecológica e relacional das atividades, suprimento das populações, estruturas organizacionais, entre outros), cultural (sujeito como protagonista no processo) e econômica (recurso financeiro).

Compreender a vulnerabilidade do ecossistema da bacia hidrográfica visa correlacionar os atributos ambientais na unidade territorial a partir de ferramentas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (Panda et al., 2022; Lira et al., 2025; Belhadj, et al., 2025), para estimar as regiões mais naturalmente frágeis e inserir as atividades antrópicas no intuito de indicar a corresponsabilização entre usuários, trabalhadores e gestores.

Nesse contexto o desenvolvimento de atividades sustentáveis é entendido como implementação manejo conservacionistas e oferta de produtos de boa qualidade ao articular os avanços tecnológicos com adequação e com melhores condições de trabalho dos profissionais. Desde o surgimento das práticas de manejo do solo e da preservação da água ocorreram significativas mudanças em seu arranjo espacial, tanto devido à transformação na forma de manejo ao longo dos tempos, quanto na criação de leis e normas para estabelecer práticas que visem o manejo e a conservação.

Nesse cenário a classificação de solos surge como ferramenta para contribuir com a sustentabilidade na escala da paisagem e prever impactos de práticas de manejo na agricultura e silvicultura. Com o passar dos anos, novas tecnologias na implementação dos sistemas de produção e na forma de condução das atividades antrópicas agropecuárias e florestais surgiram e contribuíram para que os sistemas fossem conduzidos de forma mais sustentável.

Por entender que um dos aspectos a ser considerado para o desenvolvimento de práticas conservacionistas é o ambiente físico da bacia e que a implementação das ações no sistema de produção vegetal, florestal e animal possui uma relação direta com o espaço, torna-se importante, portanto, compreender os atributos ambientais a fim de melhor interpretar a fragilidade do ecossistema e poder assim elaborar projetos de manejo e conservação do solo e da água mais responsivos (Pissarra et al., 2021b; Maximus, 2025).

O foco principal é oferecer uma tecnologia que vise proporcionar aos produtores rurais um conhecimento mais acurado do ambiente da bacia. Assim, há uma necessidade por estudos que verifiquem, investiguem e identifiquem fatores capazes de minimizar o impacto negativo ao meio e comprovar que o ambiente exerce influência sobre as atividades humanas. Investiga-se como o ambiente natural ocorre e como os produtores podem interferir no espaço e quais as possíveis formas de configurá-lo para que seja mais adequado ao uso e à apropriação sustentável. Portanto, deve-se pensar o espaço geográfico para as futuras gerações, conforme trabalhos a seguir:

Caldas et al. (2018) estudaram a vulnerabilidade ambiental e os conflitos de uso da terra na bacia de Batatais-SP. Os autores identificaram que o uso inadequado do solo e a ocupação desordenada intensificam os processos de degradação, principalmente em áreas suscetíveis à erosão. A pesquisa reforça a importância do planejamento ambiental integrado para a conservação dos recursos naturais e a redução de impactos ambientais.

Roncancio et al. (2020) analisaram a relação entre práticas agrícolas e a vulnerabilidade dos recursos naturais. O estudo demonstra que o manejo inadequado afeta a qualidade do solo e da água, ampliando a fragilidade ambiental. A pesquisa propõe ações de conservação e uso sustentável do solo, associando indicadores ambientais a políticas públicas voltadas à redução da vulnerabilidade.

Moreira et al. (2024) avaliaram a vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais por meio de uma análise bibliométrica sistemática. Foram identificados os

principais temas, regiões estudadas e lacunas de pesquisa. Os autores destacam a necessidade de abordagens multidisciplinares para enfrentar os desafios de gestão ambiental em áreas estuarinas, onde há alta complexidade ecológica e pressão antrópica crescente.

Moura et al. (2024) apresentaram uma proposta de um Índice de Vulnerabilidade Socioambiental (SEVI) aplicado ao sul de Minas Gerais. O índice integra variáveis ambientais e sociais para hierarquizar áreas quanto ao grau de vulnerabilidade. Os resultados oferecem subsídios para políticas públicas de ordenamento territorial e mostram a importância da análise integrada entre natureza e sociedade.

Santos et al. (2025) avaliaram a vulnerabilidade socioambiental da cidade de Blumenau (SC) frente a desastres naturais. Com base em mapeamento e análise espacial, foram identificadas áreas críticas com alta suscetibilidade a eventos extremos. Os autores recomendam ações preventivas de planejamento urbano resiliente, além da incorporação de critérios de risco ambiental em políticas públicas locais.

4.2 Uso de Geotecnologias no Monitoramento da Vulnerabilidade Ambiental

O avanço das geotecnologias tem proporcionado ferramentas cada vez mais eficazes para o monitoramento da vulnerabilidade ambiental, permitindo análises integradas e espacialmente explícitas que auxiliam no planejamento territorial e na gestão de recursos naturais. Entre essas ferramentas, destacam-se os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), o sensoriamento remoto, os modelos digitais de terreno (MDT) e as técnicas de geoprocessamento aplicadas a bancos de dados ambientais (FLORENZANO, 2011).

O sensoriamento remoto, a partir de imagens de satélite e drones, possibilita o acompanhamento contínuo de mudanças no uso e cobertura do solo, identificando

áreas suscetíveis à degradação e auxiliando na detecção de padrões espaciais de vulnerabilidade. Segundo Jensen (2009), “as imagens orbitais permitem análises multitemporais essenciais para a compreensão da dinâmica ambiental”. De forma semelhante, a utilização de modelos digitais de elevação (MDE) possibilita a extração de variáveis topográficas, como declividade, hipsometria e direção de fluxo, que são fundamentais na análise da suscetibilidade a processos erosivos e no cálculo de índices de vulnerabilidade (NOVO, 2010).

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) representam um papel central nesse processo, pois permitem integrar diferentes camadas de informação (uso do solo, solos, geologia, hidrografia, clima, entre outras), atribuir pesos aos indicadores e gerar mapas temáticos que sintetizam o grau de vulnerabilidade de uma determinada região. Esse tipo de abordagem favorece análises multicritério, que permitem maior robustez na avaliação e maior transparência nos critérios adotados (YE et al., 2025).

Além disso, a aplicação de geotecnologias possibilita a atualização periódica dos indicadores, tornando o processo de monitoramento mais dinâmico e eficiente. Com isso, gestores ambientais podem identificar áreas críticas em tempo quase real e propor medidas preventivas ou corretivas de forma mais assertiva.

Nesse contexto, o uso de geotecnologias se mostra indispensável para trabalhos de monitoramento da vulnerabilidade ambiental, pois alia precisão espacial, rapidez na coleta de dados e capacidade de integração multidisciplinar, fortalecendo o processo de tomada de decisão e o planejamento ambiental sustentável (YE et al., 2025; FLORENZANO, 2011).

5. MATERIAL E MÉTODOS

A determinação da vulnerabilidade ambiental envolveu um conjunto de etapas sistemáticas que integraram variáveis para avaliar o grau de sensibilidade de uma área a processos de degradação ambiental. No processo de delimitação da área de estudo foi definido o recorte geográfico da região 15 da bacia hidrográfica do córrego Rico (BHCR), (Figura 1), a partir dos dados cartográficos e imagens de satélite.

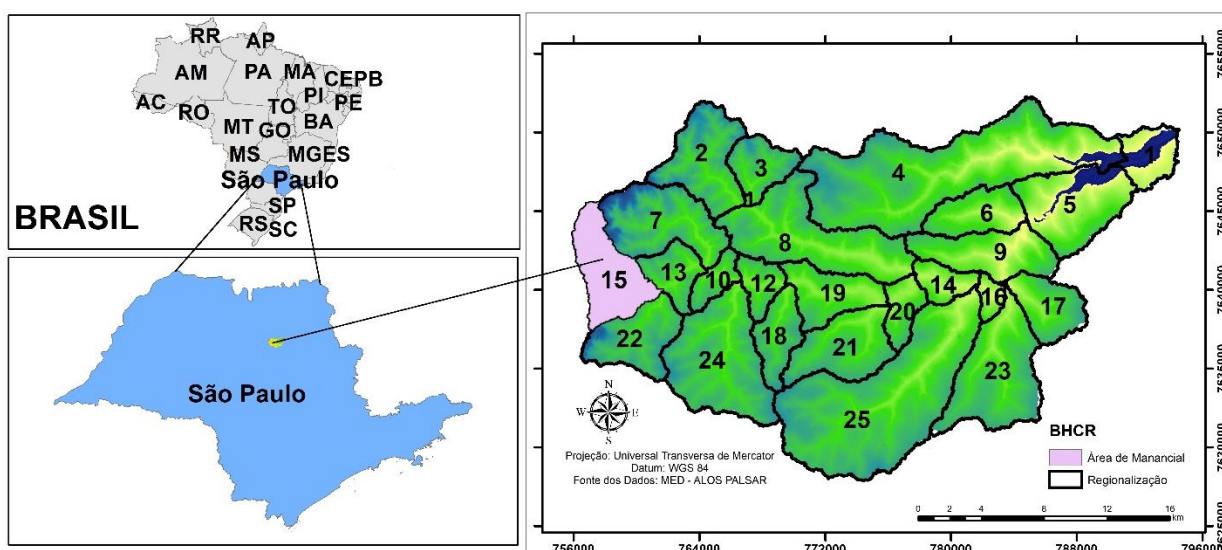


Figura 1-Localização da área de estudo na BHCR, SP.

A BHCR está localizada no estado de São Paulo, Brasil. A região 15 - Área de manancial da BHCR foi selecionada para o desenvolvimento deste estudo e está localizada entre as coordenadas UTM de 754627,59 mE; 762490,36 mE e 7646031,07 mS e 7637317,66 mS, Zona 22K, com elevação variando de 577 a 748 metros (Figura 2a).

A regionalização foi idealizada no intuito de dividir o espaço geográfico (região 15 da BHCR) em áreas menores. Primeiramente, dividida em 59 regiões hidrológicas (Figura 2a), em seguida em um conjunto contínuo das áreas a montante (nascentes) e das áreas a jusante (Figura 2b), caracterizada por

condições naturais similares, com base em critérios específicos, como características físicas e elevação.

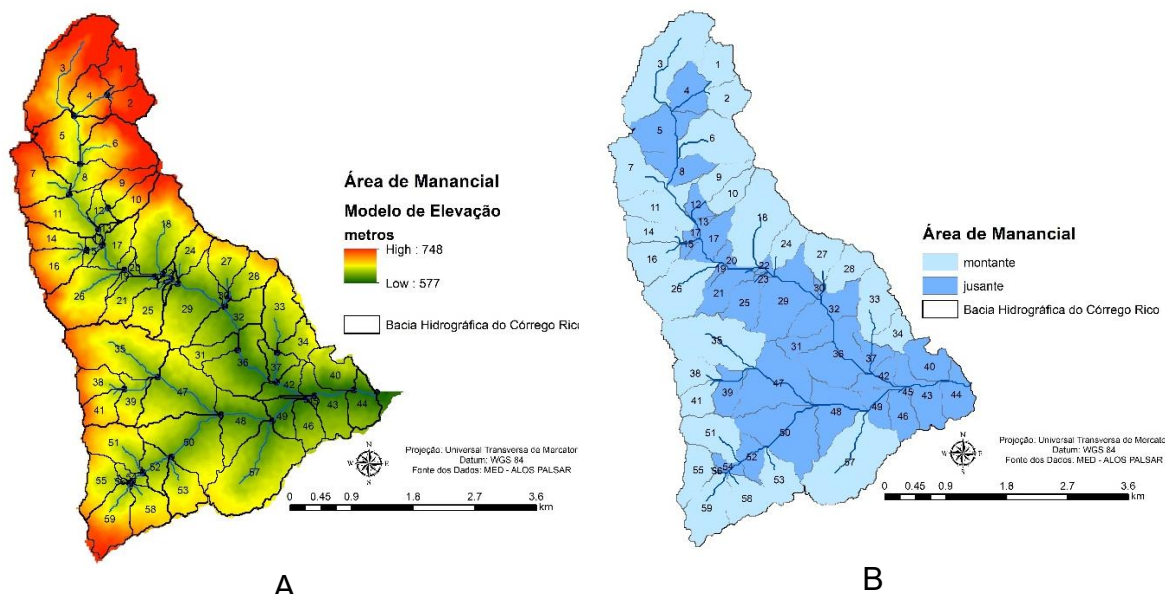


Figura 2-Regiões hidrológicas da área de manancial da BHCR, SP.

Essas regionalizações oferecem uma perspectiva analítica que facilita a compreensão das relações das dinâmicas da paisagem e das interações entre os ambientes mais altos e baixos, no intuito de facilitar a análise, compreensão e gestão desse espaço. É uma ferramenta importante para entender as diferenças e semelhanças entre as áreas, permitindo a elaboração de políticas públicas mais eficazes e direcionadas.

O estado de vulnerabilidade da área de manancial da bacia hidrográfica do córrego Rico foi determinado de acordo com a metodologia de vulnerabilidade ambiental, definida em trabalhos desenvolvidos por Crepani et al. (2001), Valle Júnior et al. (2015); Nascimento et al. (2016), Pissarra et al. (2021); Santos et al. (2024).

Para a seleção de indicadores ambientais foram definidas as seguintes variáveis: geologia; solo; declividade; cobertura vegetal natural e uso do solo atual. A coleta e o tratamento de dados foram realizados a partir dos levantamentos de dados geográficos e processamento em Sistemas de Informações Geográficas

(SIG). A padronização e reclassificação dos dados em escalas de risco foram definidas a partir da atribuição de pesos (métodos multicritério) na aplicação de métodos como AHP (*Analytic Hierarchy Process*) no intuito de definir a importância relativa de cada variável., de acordo com os trabalhos desenvolvidos por Pissarra et al. (2021).

$$V_u = (0,056 * G) + (0,122 * S) + (0,263 * Dd) + (0,558 * U_{so}) \quad \text{Eq.1}$$

Onde: V_u =vulnerabilidade ambiental G =geologia; S =solo; Dd =declividade; U_{so} =cobertura vegetal natural e uso do solo atual

Os mapas temáticos foram gerados com pesos normalizados seguindo a metodologia de Pissarra et al. (2021) e foi realizada a análise espacial integrada com o cruzamento dos mapas temáticos por álgebra de mapas (overlay). A geração do mapa de vulnerabilidade ambiental final foi idealizada com a classificação das áreas (de muito baixa a muito alta vulnerabilidade). Para a validação e análise dos resultados foi realizada a comparação dos resultados com dados empíricos (áreas degradadas conhecidas, eventos erosivos etc.) e foi realizada a análise crítica da coerência espacial dos resultados.

Cada característica representou um fator de vulnerabilidade. Por meio de álgebra de mapas, equacionado pela média aritmética dos fatores, foi obtido o valor de índice. Cada índice foi definido pela reclassificação de pixels do arquivo da declividade, agrupando-os de acordo com os índices tabelados propostos por Crepani et al. (2001) e Pissarra et al. (2021).

O método de álgebra de mapas consistiu na aplicação de operações matemáticas para associar várias camadas de modo a obter como resultado, classificações que permitem análises diversas. Para isso, foram utilizadas as ferramentas calculadoras do “raster” e reclassificação para atribuição dos valores das classes de vulnerabilidade ambiental. O mapa temático gerado foi estratificado em 5 intervalos, cada um representando uma classe de vulnerabilidade ambiental,

sendo elas: 1) Vulnerável, 2) Moderadamente vulnerável, 3) Medianamente vulnerável, 4) Moderadamente estável e 5) Estável (Crepani et al. 2001).

A classe Estável são as áreas que não possuem atividade antrópica e que possuem pouca perda de solo; a Moderadamente estável são áreas que não estão totalmente estáveis; a Medianamente vulnerável são áreas que já possuem algumas atividades antrópica e possuem perda de solo; a Moderadamente vulnerável são áreas que possuem atividade antrópica e que tem perda de solo alta, e a classe Vulnerável são áreas muito antrópicas e possuem muita perda de solo.

Para definir as zonas prioritárias (Figura 3), foram identificadas as áreas críticas que exigem intervenção urgente (conservação, recuperação, manejo) no intuito de auxiliar na elaboração de propostas para políticas públicas e ações de mitigação.

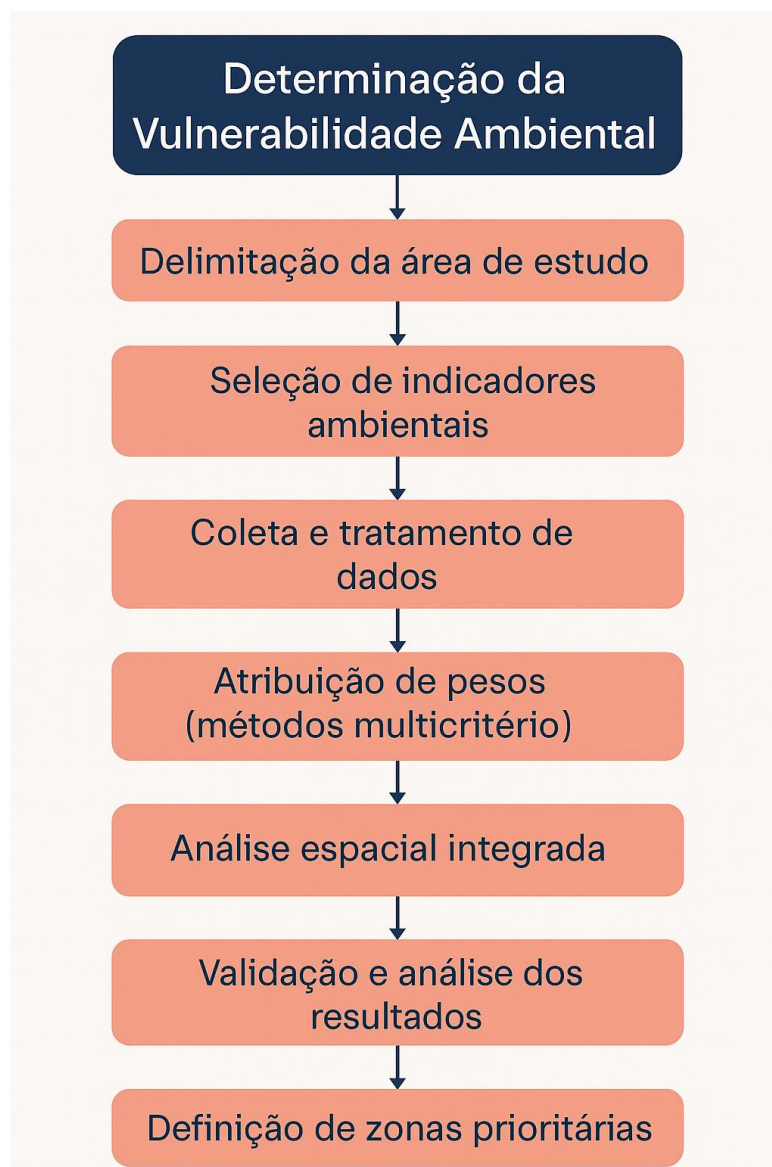


Figura 3-Fluxograma metodológico.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A vulnerabilidade ambiental pode ser conceituada como o grau de suscetibilidade de um determinado espaço geográfico a sofrer impactos adversos decorrentes de processos naturais ou antrópicos. Tal vulnerabilidade é determinada pela interação de fatores intrínsecos ao meio físico, como a geologia, as

características pedológicas, a declividade do relevo, a cobertura vegetal remanescente e o uso e ocupação do solo. Áreas que apresentam solos rasos ou de baixa capacidade de retenção hídrica, relevo acentuado e cobertura vegetal reduzida são mais propensas a processos de degradação, tais como erosão, assoreamento de cursos d'água e perda de biodiversidade. Ademais, a intensificação de atividades antrópicas, como agricultura mecanizada sem práticas conservacionistas, supressão da vegetação nativa e expansão urbana desordenada, potencializa a fragilidade desses ecossistemas, ampliando os riscos de ocorrência de eventos críticos, como deslizamentos de massa e inundações.

A análise da vulnerabilidade ambiental, portanto, constitui ferramenta essencial para o planejamento territorial e a gestão ambiental, uma vez que subsidia a definição de zonas prioritárias para conservação, a implementação de medidas mitigadoras e o manejo sustentável dos recursos naturais, garantindo o equilíbrio ecológico e a redução de riscos socioambientais. (Figuras 4, 5, 6 e 7).

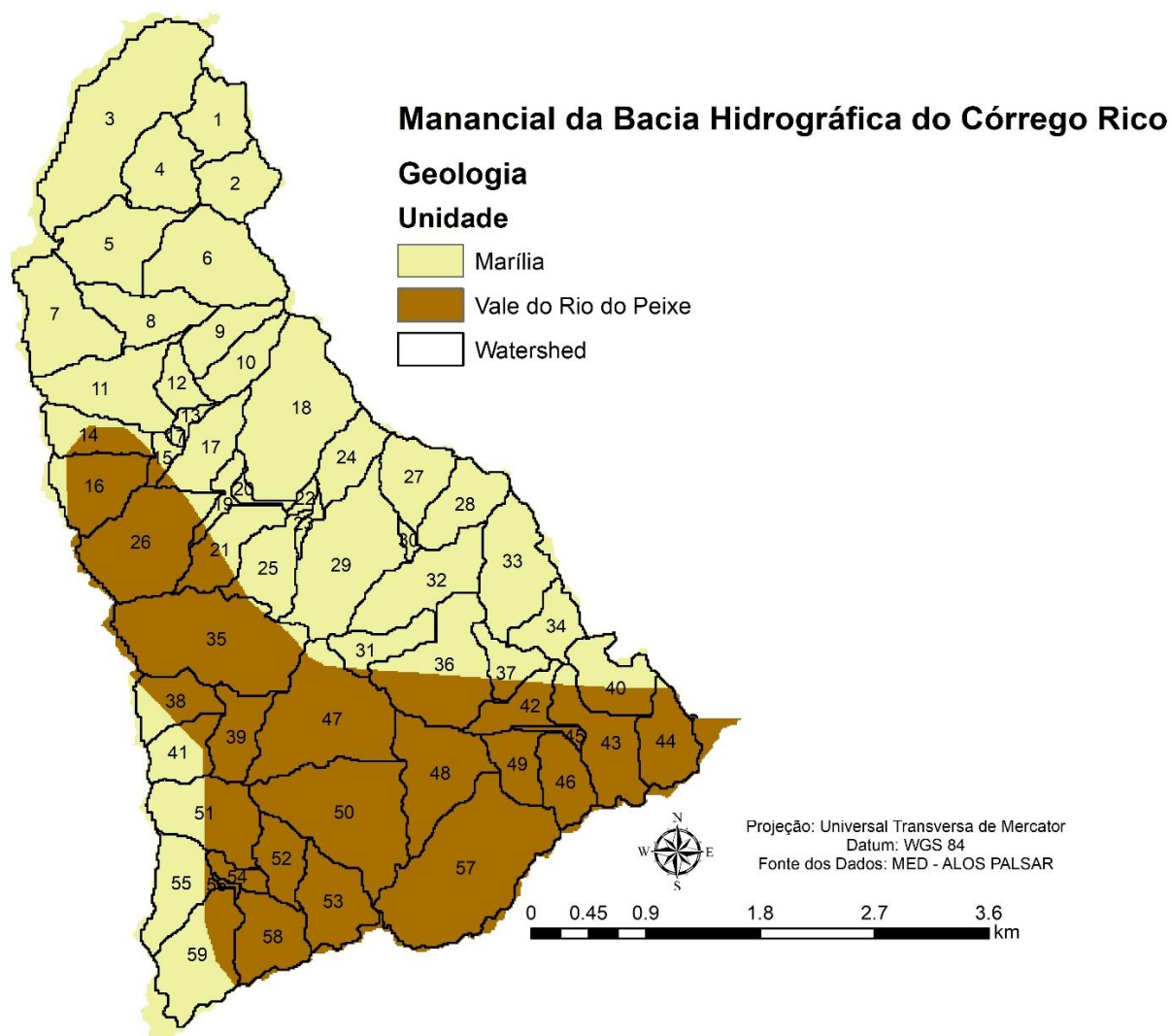


Figura 4-Geologia da área de manancial da BHCR, SP.

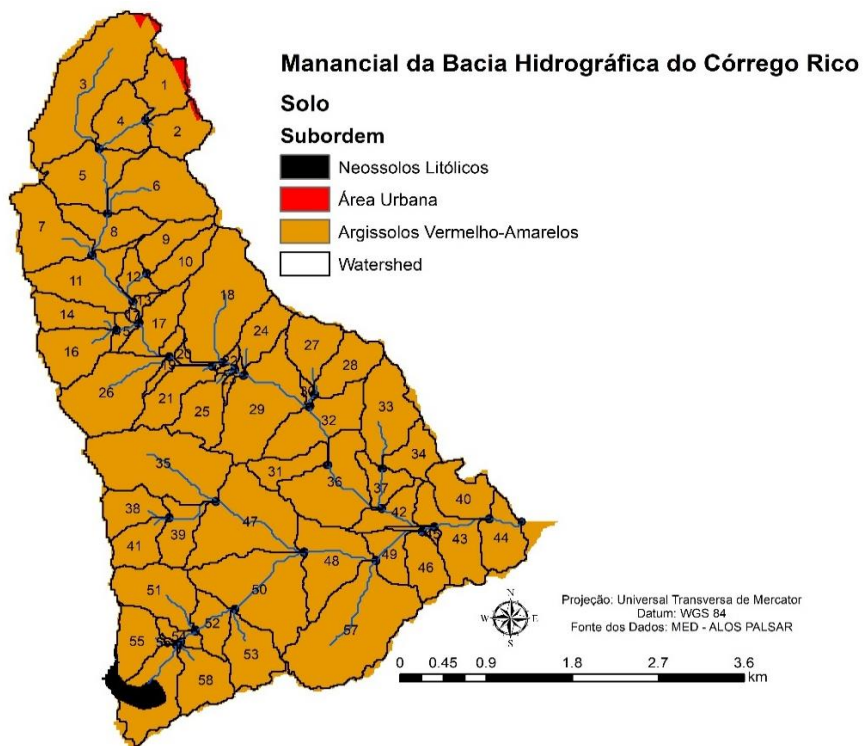


Figura 5-Unidade de solo da área de manancial da BHCR, SP.

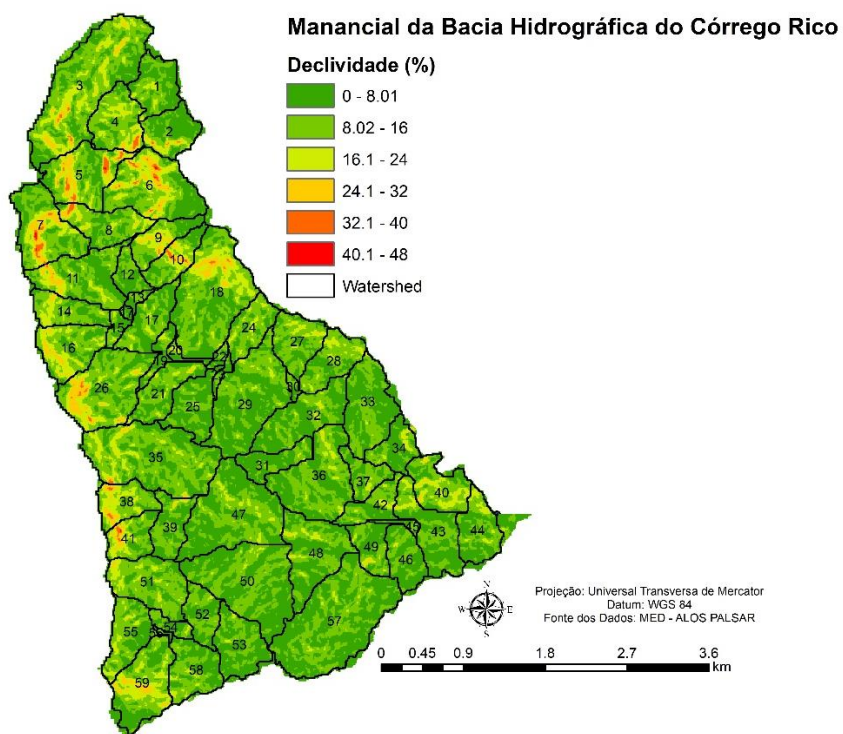


Figura 6-Declividade da área de manancial da BHCR, SP.

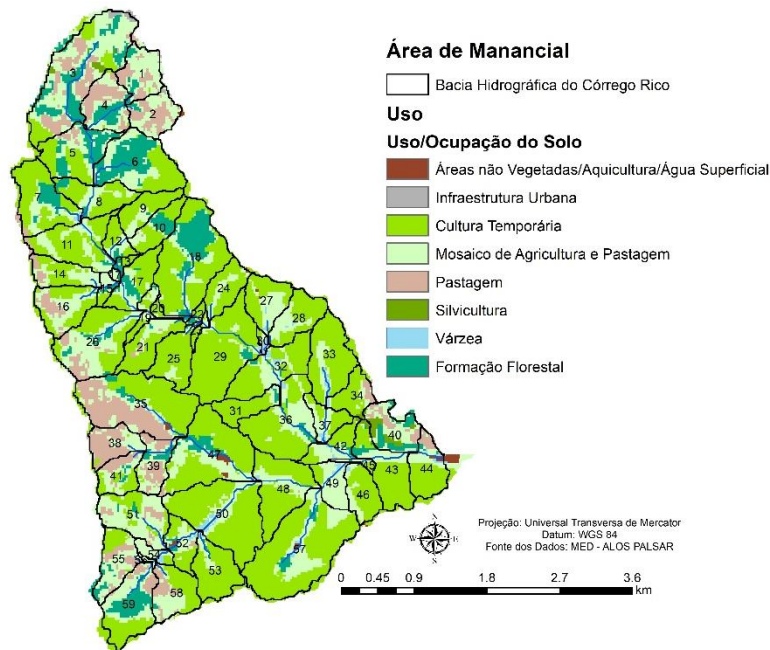


Figura 7-Cobertura vegetal e uso atual do solo da área de manancial da BHCR, SP.

A vulnerabilidade ambiental é uma característica que indicou a fragilidade da área de manancial da BHCR e envolveu mais do que apenas aspectos naturais. O processo está relacionado à sensibilidade do ambiente em responder ou se adaptar a alterações causadas por fatores naturais ou antrópicos (causados pelo ser humano).

O mapa de vulnerabilidade ambiental (Figura 7) refere-se ao grau de fragilidade do ecossistema de manancial da BHCR frente a alterações naturais ou antrópicas, e à sua capacidade de resistir, adaptar-se ou recuperar-se dessas interferências. Ele resulta da interação entre os atributos físicos, químicos e biológicos do ambiente e os usos e pressões impostos pelas atividades humanas, como desmatamento, uso intensivo do solo e ocupação desordenada (Caldas et al., 2018).

A vulnerabilidade ambiental é um conceito fundamental para o planejamento territorial e a gestão ambiental, pois permite identificar áreas mais suscetíveis à degradação dos recursos naturais, como o solo, a água e a biodiversidade. O grau de vulnerabilidade foi classificado em: Estável (1,1-2,4); Moderadamente Estável

(2,5-3,6); Medianamente Estável/Vulnerável (3,7-4,9); Moderadamente Vulnerável (5,0-6,1); Vulnerável (6,2-7,4).

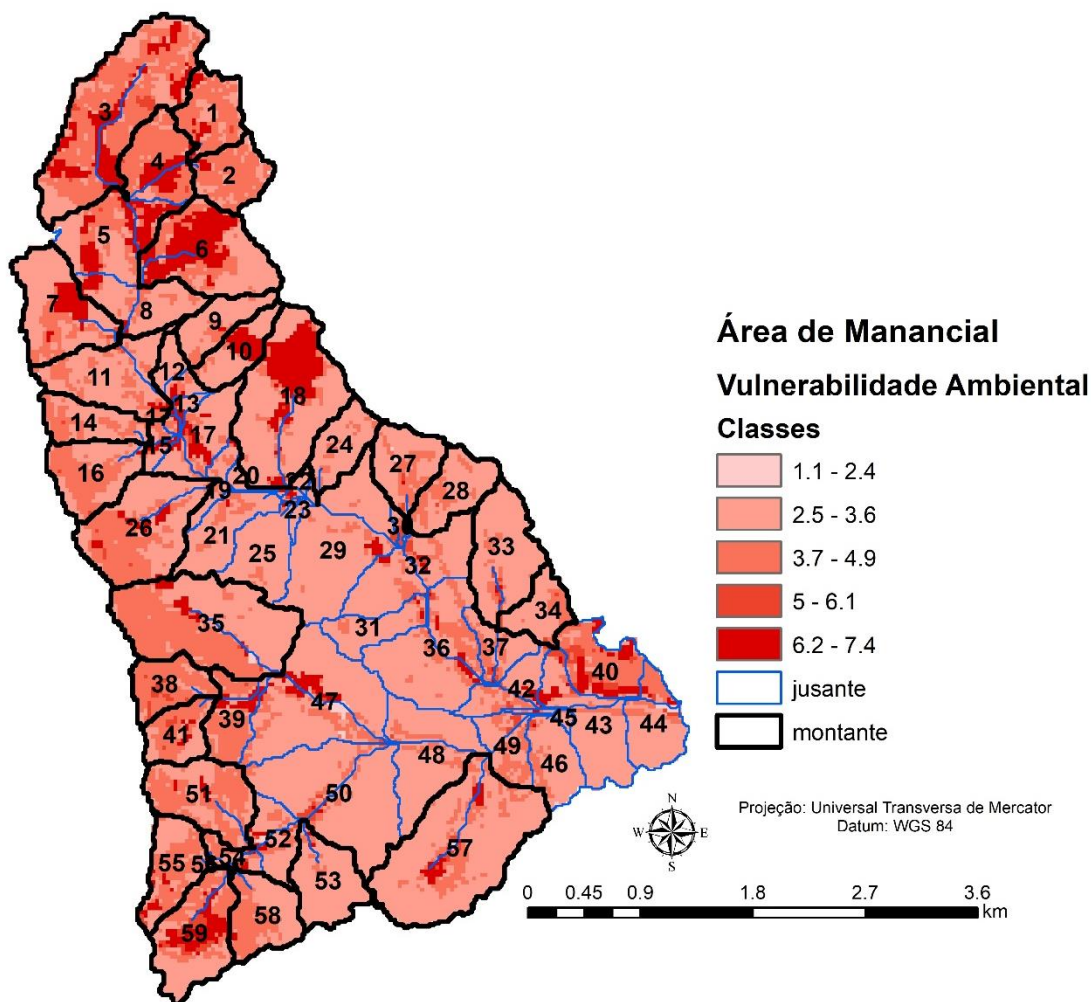


Figura 8-Vulnerabilidade ambiental da área de manancial da BHCR, SP.

Identificam-se como mais vulneráveis os ambientes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 18, 40, 55, 58, 59 (Figura 8). Enquanto a vulnerabilidade constitui geralmente um aspecto importante de áreas mais frágeis, implementar um sistema de produção não significa não ser vulnerável. Tanto o manejo do solo quanto da água como a vulnerabilidade são dinâmicos. Os locais onde são implementadas as ações de manejo podem não ser vulneráveis. Contudo, quando o produtor aplica uma prática de manejo não conservacionista, ocorre ambientes inerentemente vulneráveis porque o solo sofre o manejo inadequado devido a aplicação das práticas

insuficientes. Da mesma forma, o seu acesso aos sistemas de produção conservacionista pode ser limitado.

A vulnerabilidade do meio ambiente reflete situações de deterioração do solo e o efeito na qualidade do recurso hídrico. Examinando a vulnerabilidade por um prisma de desenvolvimento das atividades antrópicas, chama-se a atenção para o risco de deterioração futura das circunstâncias e das áreas que se aplica o manejo inadequado, pelo que é preciso desenvolver políticas e outras medidas tendentes a prevenir ameaças e a reforçar o processo de aplicação de atividades de manejo com vistas a conservação do solo e da água.

Avaliar a vulnerabilidade ambiental auxilia na antecipação de riscos, como erosão, perda de fertilidade do solo, escassez hídrica e desmatamento, possibilitando a adoção de medidas preventivas e de mitigação. Além disso, é uma ferramenta estratégica para priorizar ações de conservação e recuperação ambiental, orientar o uso e ocupação do solo e embasar políticas públicas mais eficientes e equitativas.

A consideração da vulnerabilidade também é essencial em contextos de mudanças climáticas, pois permite entender como diferentes ecossistemas e populações podem reagir a pressões ambientais crescentes. Portanto, conhecer e mapear a vulnerabilidade ambiental é vital para promover o desenvolvimento sustentável, garantindo a resiliência dos sistemas naturais e o bem-estar das comunidades humanas.

A compreensão da vulnerabilidade ambiental facilita a formulação de políticas públicas e de planos de uso e manejo sustentável dos recursos naturais. Essa análise permitiu identificar áreas mais suscetíveis à degradação, no intuito de orientar práticas conservacionistas, prevenir riscos ambientais e mitigar impactos decorrentes do uso inadequado da terra. Em bacias hidrográficas, por exemplo, a avaliação da vulnerabilidade é essencial para planejar intervenções que assegurem a conservação do solo, da água e da biodiversidade (Roncancio et al., 2020;

Pissarra et al., 2021). Sendo assim, essas áreas se encontram mais vulneráveis ao que possa advir da exposição as ações antrópicas (Figura 8)

Para a implementação das práticas de manejo do solo, o desenvolvimento das atividades consiste em uma série das escolhas, tendo em vista que a vulnerabilidade do meio decorre essencialmente de uma restrição de utilizar um manejo adequado e aplicar práticas de manejo e conservação do solo e da água. Muito frequentemente a vulnerabilidade está associada a práticas de manejo do solo inadequadas, de falta de estudo, cultura e hábitos sociais, económicos, políticos, ambientais, o que pressupõem uma dimensão de risco e fragilidade. A maior parte da superfície encontra-se em diferentes níveis de vulneráveis, em muitos aspectos a situações e circunstâncias adversas, alguns dos quais não podem ser antecipados ou evitados. Todavia, a vulnerabilidade enquanto conceito pode tornar-se menos abstrata quando a análise recai sobre qual parte da bacia hidrográfica encontra-se mais vulnerável, a que é vulnerável e por quê.

7. CONCLUSÕES

A vulnerabilidade ambiental constitui um dos principais indicadores da fragilidade de áreas inseridas em bacias hidrográficas, permitindo compreender a relação entre os atributos físicos do meio e as pressões antrópicas incidentes. Na área de manancial da bacia hidrográfica do córrego Rico, observou-se maior vulnerabilidade nas porções a montante, correspondentes às nascentes, que apresentam maiores elevações e sensibilidade natural a processos de degradação.

A análise integrada das variáveis geologia, solo, declividade, cobertura vegetal e uso do solo possibilitou identificar zonas prioritárias para manejo e conservação. Essas áreas demandam a adoção de práticas conservacionistas que reduzam riscos como erosão, perda de fertilidade, assoreamento e comprometimento da qualidade da água.

O monitoramento contínuo da vulnerabilidade ambiental e sua incorporação no planejamento territorial são fundamentais para a preservação dos recursos naturais, o atendimento às demandas humanas e econômicas e a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Dessa forma, a aplicação dessa abordagem contribui para a gestão sustentável da bacia hidrográfica, favorecendo a resiliência dos ecossistemas e a proteção dos mananciais frente às pressões atuais e futuras.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADGER, W. N. Vulnerability. *Global Environmental Change*, v. 16, n. 3, p. 268-281, 2006.

BELHADJ, C.; RIAHI, R.; SEBEI, A.; SIFI, S.; REBAI, N. Advanced groundwater potential and contamination vulnerability assessment using integrated GIS-based AHP techniques: a case study from the Bizerte watershed, Tunisia. *Environmental and Sustainability Indicators*, v. 26, p. 100597, 2025.

CALDAS, A. M.; PISSARRA, T. C. T.; COSTA, R. C. A.; NETO, F.; ZANATA, M.; PARAHYBA, R.; PACHECO, F. A. Flood vulnerability, environmental land use conflicts, and conservation of soil and water: a study in the Batatais SP municipality, Brazil. *Water*, v. 10, n. 10, p. 1357, 2018.

CANO-DÍAZ, C.; ZEISS, R.; CARVALHO-SANTOS, C.; CARVALHO, R. P.; COSTA, S. R.; DUARTE, A. C.; GUERRA, C. A. Mapping socio-environmental pressures to assess Portuguese soil vulnerability. *Applied Geography*, v. 161, p. 103103, 2023.

CHASIA, S.; OLANG, L. O.; BESS, C.; KIMUYU, J.; SITOKI, L. Assessment of soil erosion risk and vulnerability in the transboundary Sio-Malaba-Malakisi watershed in Kenya and Uganda. *Journal of Environmental Management*, v. 370, p. 122916, 2024.

COSTANZA, R. et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, v. 387, p. 253-260, 1997.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. D.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. São José dos Campos: INPE, 2001. 124 p.

FLORENZANO, T. G. Introdução ao sensoriamento remoto. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FOLEY, J. A. et al. Global consequences of land use. *Science*, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005.

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

LIRA, K. C. S.; DE JONG, M. V. Z.; KING, M.; COWX, I. G. A watershed fragility index for assessing the vulnerability of river ecosystems. *Ecological Indicators*, v. 178, p. 113908, 2025.

MAXIMUS, J. K. Assessing watershed vulnerability to erosion and sedimentation: integrating DEM and LULC data in Guyana's diverse landscapes. *HydroResearch*, v. 8, p. 178-193, 2025.

MONGER, C.; MICHÉLI, E.; ABURTO, F.; ITKIN, D. Soil classification as a tool for contributing to sustainability at the landscape scale and forecasting impacts of management practices in agriculture and forestry. *Soil and Tillage Research*, v. 244, p. 106216, 2024.

MOREIRA, J. P. et al. Vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais e desafios de gestão: uma análise bibliométrica sistemática. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 59, n. 1, p. 88-102, 2024.

MOURA, C. A. et al. A análise de vulnerabilidade socioambiental no sul de Minas Gerais. *Revista Baru*, v. 8, n. 1, p. 45-61, 2024.

NASCIMENTO, D. T. F.; ARAÚJO ROMÃO, P.; SALES, M. M.; VARGAS, C. A. L.; SANTOS AMARAL, C. M. Mapeamento da suscetibilidade e potencialidade a processos erosivos laminares e lineares ao longo do duto OSBRA da Petrobras. *Geociências*, v. 35, n. 4, p. 585-597, 2016.

NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

PANDA, S. S.; AMATYA, D. M.; GRACE, J. M.; CALDWELL, P.; MARION, D. A. Extreme precipitation-based vulnerability assessment of road-crossing drainage structures in forested watersheds using an integrated environmental modeling approach. *Environmental Modelling & Software*, v. 155, p. 105413, 2022.

PISSARRA, T. C. T. et al. Vulnerabilidade natural à erosão da bacia hidrográfica do córrego Rico. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 3, p. 1004-1018, 2021a.

PISSARRA, T. C. T.; FERNANDES, L. F. S.; PACHECO, F. A. L. Production of clean water in agriculture headwater catchments: a model based on the payment for environmental services. *Science of the Total Environment*, v. 785, p. 147331, 2021b.

RAJ, A. D.; KUMAR, S.; SOORYAMOL, K. R. Modelling climate change impact on soil loss and erosion vulnerability in a watershed of Shiwalik Himalayas. *Catena*, v. 214, p. 106279, 2022.

RONCANCIO, R. et al. Environmental vulnerability in agricultural regions: implications for land use planning and sustainable development. *Environmental Science and Policy*, v. 108, p. 96-104, 2020.

SANTOS, F. M. et al. Aplicação do índice de vulnerabilidade socioambiental a desastres naturais em Blumenau, SC. *Revista Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 14, n. 2, p. 55-70, 2025.

SANTOS, R. C. R.; SANTOS, A. A. S.; ARAÚJO ROMÃO, P.; OLIVEIRA, I. J. Vulnerabilidade ambiental e a potencialidade à perda de solos no entorno de atrativos turísticos em paisagens do Cerrado, na bacia hidrográfica do rio Caiapó, Caiapônia (GO) – Brasil. *Agua y Territorio*, n. 23, p. e7325-e7325, 2024.

TURNER, B. L. et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 100, n. 14, p. 8074-8079, 2003.

VALLE JUNIOR, R. F.; VARANDAS, S. G.; PACHECO, F. A.; PEREIRA, V. R.; SANTOS, C. F.; CORTES, R. M.; FERNANDES, L. F. S. Impacts of land use conflicts on riverine ecosystems. *Land Use Policy*, v. 43, p. 48-62, 2015.

WANG, L.; HUANG, S.; HUANG, Q.; LENG, G.; HAN, Z.; ZHAO, J.; GUO, Y. Vegetation vulnerability and resistance to hydrometeorological stresses in water- and energy-limited watersheds based on a Bayesian framework. *Catena*, v. 196, p. 104879, 2021.

YE, H.; BAI, D.; WANG, J.; TAN, S.; LIU, S. Assessment of ecosystem vulnerability in the Tropic of Cancer (Yunnan Section). *Remote Sensing, Basel*, v. 17, n. 2, p. 219, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs17020219>.