AVALIAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL DA BACIA DO RIO TIJUCO: IMPLICAÇÕES PARA O MANEJO SUSTENTÁVEL NO TRIÂNGULO MINEIRO

Lívia Caroline César Dias[1], *Neil Damas de Oliveira Junior*[2] *e Cláudio Aparecido de Almeida*[3]

[1],[2],[3] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Avenida dos Astronautas, 1758 – Jardim da Granja, São José dos Campos,SP – CEP: 12227-010; diascclivia@gmail.com[1], neil.oliveira.jr@gmail.com[2], claudio.almeida@inpe.br[3]

RESUMO

O estudo analisou a fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Tijuco, localizada no Triângulo Mineiro, e identificar áreas vulneráveis devido ao uso intensivo do solo para agricultura e pecuária. Utilizando a metodologia de Ross (1994), foram ponderadas as variáveis de declividade, litologia, pedologia e uso do solo para a criação de uma carta de fragilidade ambiental em escala de 1:50.000. Os resultados indicam que 68,11% da área da bacia apresentam fragilidade alta e muito alta, especialmente nas regiões de relevo acidentado e uso intensivo do solo. Essa vulnerabilidade evidencia a necessidade de práticas de manejo sustentável para mitigar a degradação ambiental. A análise espacial, por meio da função Álgebra de Mapas, permitiu a delimitação de áreas prioritárias para conservação. Conclui-se que o uso sustentável e o monitoramento contínuo são essenciais para garantir a resiliência ambiental e o equilíbrio entre preservação e desenvolvimento econômico na região da bacia hidrográfica do Rio Tijuco.

Palavras-chave – Fragilidade ambiental, bacia hidrográfica, suscetibilidade à erosão, impacto do uso do solo, planejamento de recursos sustentáveis.

ABSTRACT

The study analyzed the environmental fragility of the Tijuco River Basin, located in the Triângulo Mineiro region, highlighting vulnerable areas due to intensive land use for agriculture and livestock. Using Ross's (1994) methodology, variables such as slope, lithology, pedology, and land use were weighted to create an environmental fragility map at a 1:50,000 scale. The results indicate that 68.11% of the basin area has High and Very High fragility, especially in areas with steep slopes and intensive land use. This vulnerability underscores the need for sustainable management practices to mitigate environmental degradation. Spatial analysis, through the Map Algebra function, allowed for the delineation of priority areas for conservation. It is concluded that sustainable land use and continuous monitoring are essential to ensure environmental resilience and a balance between preservation and economic development in the region of the Tijuco river basin.

Key words – *Environmental fragility, river basins, land use impact, erosion susceptibility, sustainable resource planning.*

1. INTRODUÇÃO

As ações humanas têm causado transformações significativas nos recursos naturais, resultando em alterações no equilíbrio dinâmico da natureza, frequentemente manifestadas por processos erosivos e assoreamento de rios, afetando os ecossistemas e o fornecimento de serviços ambientais essenciais [1–3]. Nesse contexto, o estudo da fragilidade ambiental emerge como uma ferramenta crítica para o planejamento e gestão de bacias hidrográficas, permitindo identificar áreas vulneráveis e orientar práticas de manejo sustentável [4–6].

O conceito de fragilidade ambiental está enraizado nas unidades ecodinâmicas desenvolvidas por Tricart (1977) [7], que utilizam a teoria de sistemas para entender as interações entre os componentes da paisagem e a influência antrópica. Ross [8] expandiu essa abordagem classificando as unidades em estáveis (fragilidade potencial) e instáveis (fragilidade emergente), fornecendo uma base teórica para categorizar diferentes graus de vulnerabilidade. Estudos recentes demonstram a aplicabilidade dessas técnicas na análise integrada de variáveis físicas, biológicas e de uso do solo, fornecendo subsídios para a gestão de bacias hidrográficas e minimização de impactos ambientais [9–11].

No caso da Bacia Hidrográfica do Rio Tijuco, a ocupação intensiva e o uso do solo para atividades agrícolas, particularmente com culturas que exigem alto grau de mecanização, têm intensificado os processos erosivos e contribuído para o aumento do escoamento superficial. Esses fatores tornam a região especialmente suscetível a processos de instabilidade, exigindo um planejamento territorial que considere tanto os aspectos naturais quanto as intervenções humanas [12, 13]. Para enfrentar esses desafios, o presente estudo realizou uma análise da fragilidade ambiental da bacia baseado no uso e ocupação do solo, com o objetivo de fornecer subsídios para o planejamento e gestão sustentável dos recursos naturais na região.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Tijuco está localizada no Triângulo Mineiro e abrange partes dos municípios de Uberaba, Uberlândia, Veríssimo, Ituiutaba, Prata, Monte Alegre de Minas e Campina Verde, no Estado de Minas Gerais (Figura 1). A Bacia do Rio Tijuco compreende uma área de 1.675.299 ha, inserida no "Domínio dos Chapadões Tropicais do Brasil Central" de Ab'Saber [14]. O domínio vegetacional predominante na Bacia do Rio Tijuco

é o Cerrado, com uma pequena porção inserida na Mata Atlântica.

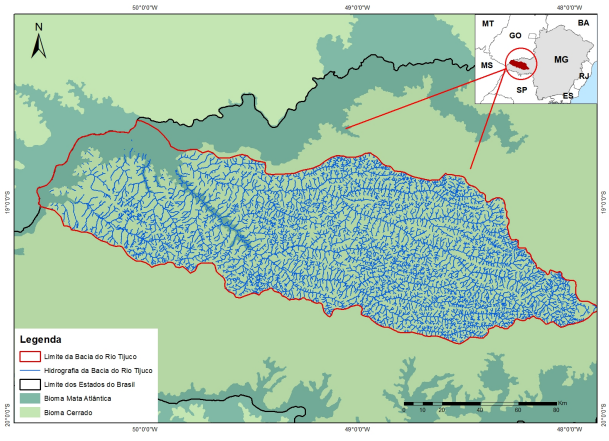


Figura 1: Localização da Bacia do Rio Tijuco no Estado de Minas Gerais, Brasil.

Este estudo utilizou a metodologia qualitativa, incorporando o método empírico para entender as respostas experimentais observadas.

2.2. Elaboração da Carta de Fragilidade Ambiental

Para a elaboração da carta de fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Tijuco, utilizamos a metodologia de Ross [8], que atribui pesos a diferentes variáveis ambientais com base em suas especificidades, avaliando seu potencial de contribuição para a fragilidade ambiental da área. Nesta análise, realizada em escala de 1:50.000, foram consideradas as variáveis de litologia, pedologia, declividade e uso e ocupação do solo, utilizando os dados mais recentes disponíveis, conforme descrito a seguir. Quando analisados em conjunto, obtém-se uma classificação de vulnerabilidade dos ambientes.

Uso e Ocupação do Solo: As informações de uso e ocupação do solo foram obtidas a partir do mapa do TerraClass Cerrado de 2022 [15]. Foi considerado apenas o mapeamento de uso e ocupação da bacia representada pelo bioma Cerrado, a porção da bacia inserida na Mata Atlântica não foi analisada Figura 2. A classe predominante é a pastagem, responsável por mais de 50% da área da bacia. Esta alta proporção de áreas destinadas à pecuária contribui significativamente para o aumento da fragilidade ambiental local, conforme demonstrado pela metodologia de Ross [8]. Os pesos atribuídos a cada categoria de uso do solo foram distribuídos de acordo com o modelo original, conforme a Tabela 1.

Declividade: A declividade da área foi agrupada em cinco classes as quais foram atribuídos pesos (0 a 6% peso 1, 6 a 12% peso 2, 12 a 20% peso 3, 20 a 30% peso 4, > 30% peso 5) (Figura 2), com base nos dados do Copernicus Global SM com resolução de 30 metros. Essas classes foram escolhidas devido à influência significativa da topografia no uso do solo, especialmente nas atividades agrícolas. As áreas de declive mais elevado foram classificadas com maior fragilidade, dado seu papel no condicionamento do uso da terra e na suscetibilidade a processos erosivos.

Pedologia: A bacia é composta por seis classes de solo (Figura 2) conforme a classificação fornecida pela SEMAD e UFV, aos quais foram atribuídos os seguintes pesos: Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo peso 1; Argissolo Vermelho-Amarelo peso 3; Cambissolo Háplico peso 4 e Gleissolo Melânico e Neossolo Quartzarênico peso 5. Há na bacia a predominância de Latossolos. Esses solos apresentam relevo geralmente plano a suave-ondulado e baixa suscetibilidade à erosão, devido à sua profundidade, porosidade e drenagem. Apesar disso, seu uso intensivo, principalmente em áreas de Latossolos, pode impactar a fragilidade ambiental, exigindo um manejo adequado [16].

Litologia: As informações litológicas da bacia foram baseadas na classificação geológica fornecida pela CODEMIG e CPRM (Figura 2), englobando quatro litotipos com os seguintes pesos: Basalto com peso 1,5; Conglomerado, siltito, rocha vulcanoclástica com peso 2,5; Sedimentos Clásticos e lateríticos ferruginos com peso 3 e; Arenito, argilito arenoso com peso 2,7 . A bacia compreende principalmente unidades do Grupo Bauru (Formação Marília) e do Grupo São Bento (Formação Serra Geral). Cada litotipo foi ponderado considerando seu papel na dinâmica erosiva e estabilidade ambiental, com base nos critérios de Ross [8].

Todas as informações espaciais foram manipuladas e integradas no software ArcGIS 10.7, no qual as camadas foram processadas, ponderadas e georreferenciadas no sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Fuso 23 Sul, datum SIRGAS 2000, garantindo a precisão espacial necessária para as análises de fragilidade ambiental.

Tabela 1: Classes de uso e ocupação do solo e seus respectivos pesos para análise de fragilidade ambiental.

Classes de Uso e ocupação do solo	Peso
Vegetação Natural Primária	1
Vegetação Natural Secundária	2
Silvicultura	3
Pastagem Arbustiva	4
Pastagem Herbácea	4
Cultura Agrícola Perene	4
Cultura Agrícola Semi Perene	4
Cultura Agrícola Temporária de 1 ciclo	5
Cultura Agrícola Temporária de mais de 1 ciclo	4
Mineração	5
Urbanizada	5
Desflorestamento no Ano	5
Corpo D'água	1
Outros Usos	5
Outras Áreas Edificadas	5

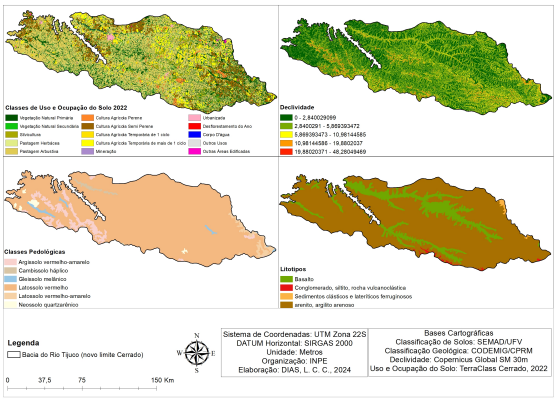


Figura 2: Mapas temáticos da Bacia do Rio Tijuco, MG. A figura mostra a distribuição espacial das classes de uso e ocupação do solo para o ano de 2022 (superior esquerdo), das classes de declividade (superior direito), tipos de solo (inferior esquerdo) e litotipos (inferior direito).

Para a elaboração da carta de Fragilidade Ambiental, foi aplicada a função Álgebra de Mapas nos softwares ArcGIS. A fragilidade foi calculada de acordo com a seguinte equação (Eq. 1)

$$\text{Fragilidade Ambiental} = \frac{\text{Declividade} + \text{Litologia} + \text{Pedologia} + \text{Uso e Ocupação}}{4} \quad (1)$$

Essa função permitiu integrar e ponderar as variáveis utilizadas no estudo, facilitando a identificação de áreas mais suscetíveis à degradação [17].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Tijuco revelou uma predominância das classes de fragilidade alta e muito alta, que juntas cobrem 68,11% da área total da bacia, correspondendo a 872.950,4 hectares (56,80%) e 173.843,5 hectares (11,31%), respectivamente (Tabela 2 e Figura 3). Essas áreas são caracterizadas por uma combinação de fatores que aumentam a vulnerabilidade ambiental, como solos suscetíveis à erosão, inclinações acentuadas e o uso intensivo do solo para atividades agropecuárias mecanizadas, o que intensifica a pressão antrópica e favorece a degradação do solo [18].

Tabela 2: Classes de fragilidade ambiental.

Grau de Fragilidade	Area (ha)	Porcentagem (%)
Baixa	412.092,7	26,81
Média	77.926,22	5,07
Alta	872.950,4	56,80
Muito Alta	173.843,5	11,31

As áreas de Fragilidade Baixa ocupam 412.092,7 hectares, representando 26,81% da bacia. Estas regiões possuem características de maior resiliência, com solos menos suscetíveis à erosão e menor declividade, o que contribui para a redução dos riscos de degradação. A classe de fragilidade média cobre 77.926,2 hectares, o que equivale a 5,07% da área total, situando-se principalmente em zonas de transição, onde há uma suscetibilidade moderada. Essas áreas demandam uma abordagem diferenciada para o manejo da bacia, considerando práticas de conservação em áreas de fragilidade elevada e medidas específicas de manejo em zonas de transição.

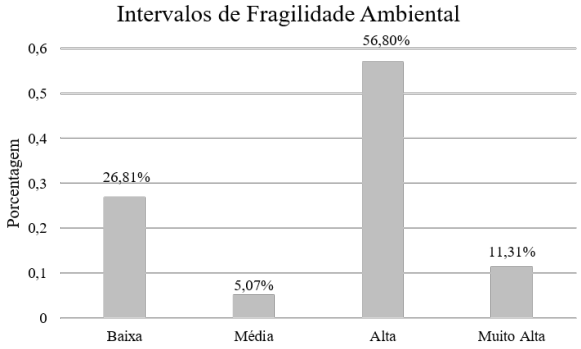


Figura 3: Distribuição percentual das classes de fragilidade ambiental em intervalos de Baixa, Média, Alta e Muito Alta para a Bacia do Rio Tijuco.

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial das classes de fragilidade ambiental pela bacia. Observa-se uma concentração de áreas de fragilidade alta e muito alta nas porções oeste e central da bacia, onde o relevo mais acidentado e o uso intensivo do solo, especialmente para pastagens, processos que intensificam os processos erosivos. Em contraste, as áreas classificadas como fragilidade baixa são predominantes na porção leste, onde o relevo é mais plano e há uma menor intensidade de uso do solo, fatores que promovem uma maior estabilidade ambiental.

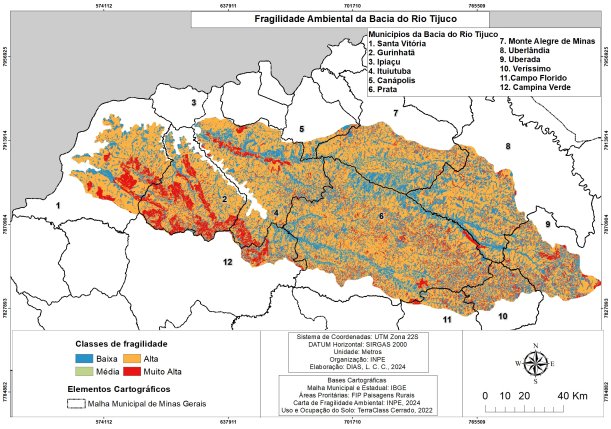


Figura 4: Mapa destacando as classes de fragilidade ambiental em intervalos de Baixa, Média, Alta e Muito Alta para a Bacia do Rio Tijuco.

Os dados indicam que as áreas de fragilidade muito alta estão frequentemente associadas a regiões onde houve uma redução significativa da vegetação nativa e uma intensificação de atividades agrícolas e de pecuária mecanizada. Essas

áreas destacadas em vermelho na Figura 4 são prioritárias para a implementação de medidas de conservação e manejo sustentável, visando mitigar os impactos das atividades humanas e reduzir o risco de degradação.

A equação de fragilidade ambiental utilizada demonstrou-se eficaz para captar a complexidade dos fatores que influenciam a vulnerabilidade da bacia. A ponderação das variáveis permitiu identificar com precisão as áreas mais sensíveis e fornecer uma visão espacial das regiões que demandam intervenções urgentes de conservação [17].

Esses resultados ressaltam a importância de um planejamento territorial que considere tanto os aspectos naturais quanto as intervenções humanas na Bacia do Rio Tijuco. A alta proporção de áreas com fragilidade elevada indica uma pressão antrópica significativa, o que reforça a necessidade de práticas de manejo sustentável, especialmente nas áreas de uso intensivo.

4. CONCLUSÕES

A metodologia utilizada foi eficaz em identificar áreas prioritárias para intervenção, permitindo uma visualização precisa dos gradientes de fragilidade. O estudo da fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Tijuco revela um quadro de vulnerabilidade significativa, influenciado por pressões antrópicas e características naturais que requerem atenção para a gestão sustentável da região.

A predominância das classes de alta e muito alta fragilidade destaca a necessidade urgente de práticas de manejo de atividades agrícolas que reduzam a degradação do solo e protejam os serviços ambientais fornecidos pela bacia.A continuidade dos estudos e do monitoramento ambiental será fundamental para adaptar e aperfeiçoar as estratégias de manejo e planejamento territorial.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico - CNPq processo 422354/2023-6 (Monitoramento e avisos de mudanças de cobertura da terra nos Biomas Brasileiros – capacitação e semi-automatização do programa Biomasbr), sediado e executado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Agradecemos também à Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH Brasil através do Projeto FIP Paisagem.

6. REFERÊNCIAS

[1] C. SPÖRL and J.L.S. ROSS. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. *GeoUSP*, 15:39–49, 2004.

[2] H.M. Burcher, C.L.; Valett and E.F Benfield. The land-cover cascade: relationships coupling land and water. *Ecology*, 88:228–242, 2007.

[3] R.M.; Kaufmann P.R. Macedo, D.R.; Hughes and M Callisto. Development and validation of an environmental fragility index (efi) for the neotropical savannah biome. *Science of the Total Environment*, 635:1267–1279, 2018.

[4] A.M Tomczyk. A gis assessment and modelling of environmen-tal sensitivity of recreational trails: The case of gorce national park, poland. *Applied Geography*, 31:339–351, 2011.

[5] C.W.and et al. Costa. Fragilidade ambiental e escassez hídrica em bacias hidrográficas: Manancial do rio das araras - araras, sp. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20:946–958, 2015.

[6] M.R. Valle, I.C.; Francelino and H.S.K Pinheiro. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia do rio aldeia velha, rj. *Floresta e Ambiente*, 23:295–308, 2016.

[7] J. Tricart. *Ecodinâmica.* IBGE/SUPREN, Rio de Janeiro, 1977.

[8] J. L. S ROSS. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. *Revista do Departamento de Geografia–USP*, 8:63–74, 1994.

[9] J.C. Martín-Duque, J.F.; García and L.C Urquí. Geoheritage infor-mation for geoconservation and geotourism through the catego-rization of landforms in a karstic landscape: a case study from covalagua and las tuerces (palencia, spain). *Geoheritage*, 4:93–108, 2012.

[10] A.M.; Urbano R.C. Manfré, L.A.; Silva and J. Rodgers. Environ-mental fragility evaluation and guidelines for environmental zoning: a study case on ibiuna (the southeastern brazilian region). *Environmental Earth Sciences*, 69:947–957, 2013.

[11] E.F. Celestino and et al. Environmental assess-ment in neotropical watersheds: A multi-factorial approach. *Sustainability*, 11:1–17, 2019.

[12] Â.T.and et al. Fushita. Fragilidade ambiental associada ao risco potencial de erosão de uma área da região geoeconômica médio mogi guaçu superior (sp). *Revista Brasileira de Cartografia*, 11:477–488, 2010.

[13] B.; Gao G.; Lü Y.; Liu Y.; Lü N. Zhou, J.; Fu and S. Wang. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the loess plateau, china. *Catena*, 137:1–11, 2016.

[14] A.N. Ab'Saber. *A organização natural das paisagens inter e subtropicais brasileiras.* Edgard Blucher, São Paulo, 1971.

[15] Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) and INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Geoportal terraclass. In *Projeto TerraClass*. Embrapa Cerrados, Brasília, 2022.

[16] P.S.G. Teixeira, M.A.; Magalhães and O.A Braunbeck. Equipamento para extração de amostras indeformadas de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24:693–699, 2000.

[17] L.E. Trevizan, P.D.; Moschini. Determinação das áreas com fragilidade ambiental do município de são carlos, são paulo, brasil. *Geografia, Ensino Pesquisa*, 20:159–167, 2016.

[18] Thomas Keller, Maria Sandin, Tino Colombi, Rainer Horn, and Dani Or. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194:104293, 2019.