



## **Análise da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Arroio Chasqueiro e do seu distrito de irrigação – RS**

Arlene Fehrenbach<sup>1</sup>, Nelva Bugoni Riquetti<sup>2</sup>, George Marinho Soares Gonçalves<sup>3</sup>, Guilherme Kruger Bartels<sup>4</sup>, Gilberto Loguercio Collares<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Discente do curso de graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, UFPel. E-mail: arlenefehrenbach@outlook.com, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas, RS, Brasil. <sup>2</sup>Doutora em Recursos Hídricos, UFPel. E-mail: nelva.bugoni@gmail.com. <sup>3</sup>Docente do curso de graduação em engenharia hídrica, UFPel. E-mail: george.marino.goncalves@gmail.com. <sup>4</sup>Doutor em Recursos Hídricos, UFPel. E-mail: guilhermebartels@gmail.com. <sup>5</sup>Docente do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, UFPel. E-mail: gilbertocollares@gmail.com.

Artigo recebido em 22/ 05/2023 e aceito em 27/ 05/2024

### **RESUMO**

A avaliação da fragilidade ambiental caracteriza-se como um instrumento essencial para o planejamento territorial, tendo como princípio básico identificar as áreas suscetíveis aos processos de degradação do solo. A fragilidade pode ser dividida entre aquela atrelada aos fatores intrínsecos ao ambiente natural, ou aquela ligada ao uso e ocupação do solo. Neste estudo utilizou-se de uma análise multicritério, atrelada a técnicas de Sistema de Informação Geográfica (SIG), e dados de Sensoriamento Remoto para avaliar a fragilidade ambiental potencial, relacionada aos fatores naturais (geologia, pedologia, relevo e precipitação), bem como a fragilidade ambiental emergente, que considera as atividades antropogênicas, voltadas ao uso e ocupação do solo. Os resultados mostram que para a fragilidade ambiental potencial, assim como a emergente, as classes mais representativas são a baixa e a média, respectivamente. Esses resultados indicam que, a área possui baixa susceptibilidade natural a sofrer danos, porém, quando são implementadas ações antrópicas, existe possibilidade de ocorrer processos degradantes, sendo necessária uma gestão efetiva, com adoção de práticas conservacionistas.

Palavras-chave: Análise ambiental; Planejamento territorial; Uso e ocupação do solo; Vulnerabilidade ambiental; Geotecnologias.

## **Assessment of environmental fragility in the Arroio Chasqueiro watershed and its irrigation district - RS state, Brazil**

### **ABSTRACT**

The assessment of environmental fragility is an excellent approach for land planning, having as a basic principle to identify susceptible areas of soil degradation processes. The fragility process can be linked either to intrinsic factors due to the environment, or to land use and occupation. In this study, a multicriteria analysis was used, associated to Geographic Information System (GIS) techniques and Remote Sensing data to assess the Potential Environmental Fragility (PEF), related to natural factors (geology, pedology, relief and precipitation), as well as, the Emerging Environmental Fragility (EEF), which considers anthropogenic activities, aimed at land use and occupation. The results show that for PEF, as well as EEF, the most representative classes are low and medium, respectively. These results indicate that the area has a low natural susceptibility to damage, however, when anthropic actions are implemented, there is a possibility of degrading processes occurring, requiring more effective land management, with the adoption of conservationist practices.

Keywords: Environmental analysis; Landscape management; Soil use and occupation; Environmental vulnerability; Geotechnologies.

### **Introdução**

Com o desenvolvimento tecnológico, a pressão aumentou sobre os recursos naturais, pressão essa que continua se expandindo em termos absolutos devido ao crescimento da

produção, atrelado ao excesso de consumo (Pinsky e Kruglianskas, 2017). A exploração do ambiente natural causa inúmeros distúrbios nos elementos bióticos e abióticos, tais como perda de solo devido a erosão, desequilíbrios em ambientes aquáticos em decorrência da adição de nutrientes

provenientes da agricultura, dentre outros exemplos (Silva et al., 2020). Neste sentido, começaram a se desenvolver importantes estudos que abordam a fragilidade ou vulnerabilidade ambiental (Ross, 1994; Crepani et al., 2001; Tagliani, 2003; Franco et al., 2011; Silva et al., 2020; Souza 2020; Silva et al., 2021; Cavalcante 2022).

A análise da fragilidade ambiental é primordial para o planejamento estratégico de determinada unidade territorial (Silva et al., 2020). A fragilidade ambiental se refere à susceptibilidade de um ambiente sofrer danos mediante a ruptura de seu equilíbrio dinâmico, aumentando o seu potencial de degradação ambiental através de processos erosivos, perda de biodiversidade, dentre outros. Portanto, o mapeamento da fragilidade determina as áreas mais suscetíveis a degradação e que demandam intervenção, sendo este, um instrumento que orienta as políticas públicas de gestão ambiental (Franco et al., 2011; Oliveira e Moreau, 2021).

Comumente, as pesquisas que realizam a análise da fragilidade ambiental adotam as bacias hidrográficas como unidade de estudo, por ser essa uma unidade territorial de grande importância para o planejamento e gestão dos recursos naturais (Melo e Santos, 2010). No entanto, a bacia hidrográfica é organizada em diferentes níveis hierárquicos, com o objetivo de representar os graus de fragilidade. Através desta organização, é possível traçar as áreas mais suscetíveis de sofrer degradação ambiental, sendo possível compreender a potencialidade de desestabilização do equilíbrio dinâmico da natureza. (Braga et al., 2017).

No entanto, compreender os graus de fragilidade de uma bacia hidrográfica pode proporcionar informações sobre o panorama ambiental da área em estudo, vindo a auxiliar na implantação de políticas públicas naquelas áreas mais suscetíveis a processos de degradação (Vieira et al., 2021). De acordo com Valle et al. (2016), a elaboração de mapas de fragilidades ambientais pode ser uma ferramenta valiosa para agências governamentais e pesquisas de planejamento territorial, tanto em escala regional quanto local.

Estudos como o proposto por Ross (1994), foram precursores na geração de estudos de fragilidade e partem do conceito de Análise Ecodinâmica apresentado por Tricart (1977), o qual atrelou as Unidades Ecodinâmicas Estáveis à fragilidade ambiental potencial e, as Unidades Ecodinâmicas Instáveis à fragilidade ambiental emergente. A fragilidade potencial está relacionada àquelas áreas onde não ocorre alteração antrópica,

onde os únicos agentes de transformação são os naturais. Por outro lado, a fragilidade ambiental emergente está associada ao modelo de uso da terra e dos recursos naturais devido a ação antrópica (Spörl, 2007; Braga et al., 2017).

Neste sentido, como descrito por Souza et al. (2020), a fragilidade potencial está ligada à fragilidade natural do ambiente, que, embora se encontrem em equilíbrio, apresentam uma instabilidade potencial diante das mudanças causadas pelas atividades humanas. São considerados fatores ambientais os tipos de rochas, os elementos morfológicos e morfométricos relacionados à geomorfologia (declividade e/ou índice de dissecação do relevo), as classes de solos, além de fatores e elementos climáticos. Paralelamente, de acordo com os mesmos autores, a fragilidade emergente, além de levar em conta os elementos naturais intrínsecos à fragilidade potencial, também considera as intervenções humanas, com o uso da terra e a alteração da cobertura vegetal.

Destarte, a análise da fragilidade ambiental é fundamental, na medida que torna possível identificar os ambientes mais suscetíveis a processos de degradação em razão da sua alta fragilidade potencial, bem como àquelas que, mesmo possuindo uma baixa fragilidade potencial, possuem um aumento demasiado da fragilidade emergente em virtude do uso e manejo incorreto (Cavalcante, 2022). Neste sentido, é possível elaborar medidas de planejamento que busquem a preservação ambiental, visando evitar a degradação e desestabilização dos sistemas naturais (Souza, 2020).

A Bacia Hidrográfica do Arroio Chasqueiro (BHAC), originalmente teve seu regime de drenagem alterado decorrente do barramento para a criação do Distrito de Irrigação da Bacia do Arroio Chasqueiro (DIBAC), assim como pela dinâmica de cobertura e uso do solo vinculada a produção agrícola, a partir da década de 1970 (Simon et al., 2017). Contudo, Vidal et al. (2021), destacam a importância do Distrito na regularização dos recursos hídricos na bacia ao longo do ano, garantindo a produção agrícola irrigada na região, além de servir como modelo de gestão de uso sustentável da água.

À vista disso, considerando o intenso uso agrícola da região, é imprescindível realizar uma análise das potencialidades e fragilidades ambientais da BHAC, bem como para o DIBAC, fato que permitirá a adequação de medidas de conservação, restauração e de uso da terra. Logo, o objetivo deste estudo foi analisar a fragilidade ambiental potencial e emergente para a área em

estudo. Para tanto, foi utilizada a metodologia proposta por Ross (1994), atrelada a metodologia indicada por Crepani et al. (2001), assim como, empregou-se o uso de SIG na perspectiva de gerar dados que contribuam para a gestão e o

planejamento ambiental da área de estudo. Ressalta-se que o objetivo se baseia na hipótese de que a intensificação das atividades antrópicas aumentou o grau de fragilidade ambiental da BHAC e do DIBAC.

## Materiais e métodos

### Aspectos Fisiográficos da Área em Estudo

A BHAC bem como o DIBAC, encontram-se integralmente localizados no município de Arroio Grande-RS, abrangendo uma área de 544,1 Km<sup>2</sup>, integrando a Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo (BHMSG), conforme ilustrado na Figura 1. A BHAC possui uma barragem de terra construída na década de 80 (Barragem do Arroio Chasqueiro), formando um reservatório oriundo da obstrução dos arroios Chasqueiro e Chasqueirinho, período esse que coincide com a criação do DIBAC, objetivando favorecer a cultura do arroz irrigado e pecuária, abrangendo uma área total de aproximadamente 20.000 hectares (Filho, 2016).

A área em questão é integrante do conjunto de bacias que afluem diretamente para a Lagoa Mirim pela porção oeste, com altitude variando na ordem de 2 a 239 m em relação ao Nível Médio do Mar – NMM. De forma geral, a área não possui declividades elevadas, sendo a declividade média de 3,35%, caracterizando-se como uma região com relevo suave ondulado, de acordo com a classificação do relevo da EMBRAPA (2018).

Em aspectos geológicos, a bacia se encontra totalmente inserida no Domínio Morfoestrutural dos Embasamentos em Estilos Complexos, da Região Geomorfológica do Planalto Sul Rio-grandense, abrangendo frações das unidades geomorfológicas Planaltos Residuais de Canguçu-Caçapava do Sul e Planalto Rebaixado Marginal e Planície Costeira (BRASIL, 1986). Segundo Simon et al. (2017), nestas unidades geomorfológicas predominam formas de relevo em padrões de colinas, com áreas de topo planas ou levemente dissecadas. De acordo com os dados do CPRM (2013), a área possui nove unidades geológicas distintas, dos seguintes períodos: neogeno, ediacarano e criogeniano. As regiões de depósitos são as formações mais recentes, pertencentes ao período neogeno, estando localizadas na região mais próxima da Lagoa Mirim. As regiões de granitos fazem parte do período ediacarano, e as de gnaisses e granitóides remetem ao período criogeniano, ambos os períodos tem origem há mais de 500 milhões de anos e, no entanto, possuem uma geologia muito mais consolidada (CPRM, 2016).

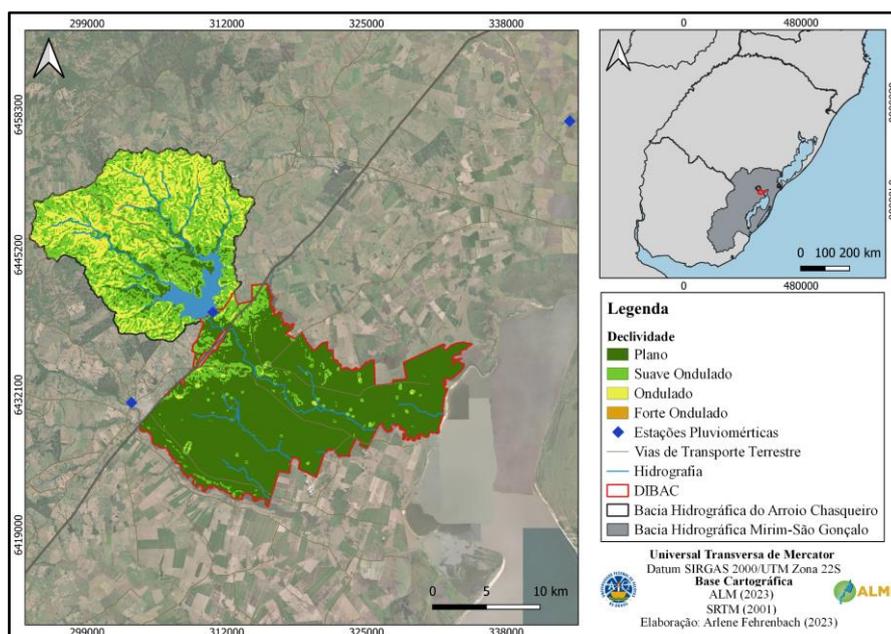


Figura 1. Localização e classificação do relevo da BHAC e DIBAC.

Fonte: SRTM (2001).

Quanto à pedologia, podem ser encontradas na área cinco classes de solos distintos, de acordo com dados do IBGE e EMBRAPA (2001). Na porção à montante do barramento (BHAC) há predominância de solos do tipo Argissolo Vermelho-amarelo Distrófico, enquanto que na área do DIBAC predominam solos do tipo Planossolo Háplico Eutrófico, porém são encontradas outras três classes, a saber: Espodossolos Indiscriminados, Gleissolo Háplico Ta Eutrófico e Organossolo Tiomórfico Sápico.

O clima da região é subtropical com verões quentes, segundo a classificação climática de Köppen é “Cfa”, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano (Alvares et al., 2013). A temperatura média anual do ar na região é de 17,8 °C, com estações bem definidas. Para o mês de janeiro, considerado o mês mais quente nesta região, a temperatura média do ar é de 23,2 °C, enquanto que

o mês de julho é considerado o mais frio, com uma temperatura média do ar de 12,3°C (EMBRAPA, 2000). Conforme as características do clima da região, a precipitação média anual apresenta variações pluviométricas, entre 1389,4 e 1391,5 mm, sendo o mês de setembro o que apresenta maior precipitação acumulada, e novembro o mês com menor volume acumulado no ano (ANA, 2022; COODIC, 2022).

Vale ressaltar que a área correspondente ao DIBAC é amplamente utilizada com culturas temporárias, principalmente para o plantio de arroz irrigado, além da pastagem e silvicultura, que também são importantes categorias de uso na região. Por outro lado, a porção correspondente a BHAC possui condições menos favoráveis para a agricultura, ocorrendo o predomínio das formações florestais e campestres, além da silvicultura.

#### *Procedimentos metodológicos*

Para o presente estudo de fragilidade ambiental, foi adotada a integração das metodologias de Ross (1994) e Crepani et al. (2001). Para Ross (1994), a análise de fragilidade ambiental apresenta cinco categorias hierárquicas,

com valores que variam de 1 a 5, enquanto que Crepani et al. (2001), atribuem valores variando de 1 a 3. No entanto, tornou-se necessário padronizar os intervalos de fragilidade (Tabela 1).

**Tabela 1.** Padronização dos intervalos de fragilidade de Crepani et al. (2001), de acordo com os valores de fragilidade de Ross (1994).

<b>Fragilidade – Ross (1994)</b>	<b>Intervalos - Crepani et al. (2001)</b>
1 – Muito baixa	1,0 - 1,3
2 – Baixa	1,4 - 1,7
3 – Média	1,8 - 2,2
4 – Alta	2,3 - 2,6
5 – Muito Alta	2,7 - 3,0

Fonte: Adaptado de Campos (2018).

À vista disso, foram elaborados os mapas das fragilidades naturais da bacia hidrográfica e do distrito de irrigação para obter a fragilidade potencial, ou seja, fragilidade pedológica, geológica, pluviométrica e de dissecação do relevo. Para obter a fragilidade ambiental emergente, que considera o fator antrópico, foi elaborado um mapa de fragilidade de uso e cobertura do solo, para possibilitar o cruzamento dos dados com o mapeamento de fragilidade potencial.

Para tal, foi utilizada a base de dados disponível pela Agência para o Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim (ALM, 2022). Utilizou-se o Modelo Digital de Elevação - MDE da *Shuttle Radar Topography Mission* - SRTM, com resolução espacial de 30m para obtenção de informações do terreno. A partir do MDE, gerou-se o índice de dissecação do relevo, utilizado para a determinação da fragilidade do relevo, sendo um

parâmetro essencial para compreender a gênese das paisagens, possibilitando também a detecção das áreas de risco. Para obter os resultados, foi adotada a metodologia de automatização do índice de dissecação do relevo indicado por Guimarães et al. (2017), que considera as variáveis propostas por Ross (1994), a saber: grau de entalhamento dos vales que nos fornece a dissecação no plano vertical (eixo y), e a dimensão interfluvial média, que nos fornece a dissecação no plano horizontal (eixo x). Para obter o resultado final da dissecação do relevo foram necessárias quatro etapas, sendo: tratamento e preparação do MDE, mapeamento do grau de entalhamento dos vales, mapeamento da dimensão interfluvial média e, cálculo dos valores de dissecação do relevo.

Para avaliar a geologia local, foi empregado o Mapa Geológico do Rio Grande do Sul através do Serviço Geológico do Brasil –

CPRM, escala 1:250.000. Os dados de solo são oriundos do Mapa de Solos do Brasil, numa escala 1:5.000.000, elaborado com base no Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 1999), e publicado pelo Instituto Brasileiro de

Geografia e Estatística (IBGE, 2001). As unidades geológicas e pedológicas presentes na área em estudo, bem como os seus quantitativos, estão dispostas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Unidades geológicas e pedológicas da BHAC e DIBAC.

	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
<b>Unidades Geológicas</b>		
Depósitos aluvionares	59,80	10,98
Depósitos de barreira holocênica - Depósitos de praias e cristas lagunares	0,49	0,09
Depósitos de barreira pleistocênica 3 – Depósitos de planície lagunar	52,07	9,57
Depósitos de barreira pleistocênica 3 – Depósitos de praias e cristas lagunares	2,70	0,50
Depósitos de planície de inundação	7,24	1,33
Depósitos de planície lagunar	149,33	27,45
Granitóides migmatizados	5,41	0,99
Gnaisses granodioríticos	150,15	27,60
Granito Arroio Grande	31,62	5,81
Granito Chasqueiro	85,29	15,68
<b>Unidades Pedológicas</b>		
Argissolo Vermelho-amarelo Distrófico	277,30	50,96
Espodosolos Indiscriminados	6,19	1,14
GleissoloHáplicoTaEutrófico	34,94	6,42
OrganossoloTiomórficoSáprico	5,18	0,95
PlanossoloHáplicoEutrófico	220,50	40,53

Para a análise pluviométrica da região, utilizou-se um compilado de dados entre os anos de 2001 e 2021 através de três Estações Meteorológicas, a saber: Chasqueiro, Granja Coronel Pedro Osório e Arroio Grande. Cabe destacar, somente a Estação Meteorológica do Chasqueiro encontra-se dentro dos limites da bacia em análise e está sob responsabilidade da Cooperativa dos Proprietários do Distrito de Irrigação da Barragem do Arroio Chasqueiro – COODIC e ALM. As demais estações se encontram nas imediações, logo, foram utilizadas por exercer influência na área em estudo. Estes dados foram obtidos do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2022).

Dos dados levantados, verificou-se que os adquiridos pela COODIC não continham falhas, entretanto, os dados obtidos da plataforma HidroWeb continham falhas, na medida em que alguns meses a precipitação não foi monitorada. Para corrigir estes dados, adotou-se o método estatístico de regressão simples, e para este procedimento foram utilizados os critérios desenvolvidos por Oliveira et al. (2010), que consiste na utilização da estação mais próxima para a correção das falhas, e com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) maior que 0,7.

Para a espacialização da precipitação média anual (mm), foi utilizado o interpolador linear *Inverse Distance Weighted* (IDW), que se baseia na dependência espacial, ou seja, consiste na obtenção de uma média ponderada de valores que são conhecidos para estimar o valor de um local sem amostragem e, no entanto, quanto mais próximo um ponto estar do outro, maior será a correlação dos seus valores, sendo os pesos inversamente proporcionais à distância (Vargas et al., 2018).

Para a elaboração do mapa de uso e cobertura do solo, foi necessário adquirir uma imagem de satélite do LANDSAT 8, para o dia 02 de novembro do ano de 2022, compreendendo o período em que o solo é preparado para as culturas temporárias, e a seguir, sendo observado diversas áreas com solos expostos. Vale destacar que a resolução espacial da imagem é de 30m, logo, adotou-se esta resolução para todos os arquivos *rasters* gerados no decorrer deste estudo.

Após realizada a correção geométrica da imagem de satélite, foi elaborada a composição das bandas B02 (*Blue*), B03 (*Green*) e B04 (*Red*) para aquisição da cor verdadeira ou natural (4R3G2B). A composição com cor natural atende ao objetivo deste processamento, na medida que almeja a identificação e quantificação das classes de uso e

cobertura do solo presentes que são facilmente visíveis ao olho humano. Para o mapeamento, utilizou-se o método da classificação supervisionada que se baseia na identificação de diferentes classes com comportamentos espectrais diferentes, visto que, para a área foram encontradas sete classes. Salienta-se, que a chave de

classificação adotada, para definir as categorias a serem mapeadas, seguem o indicado pelo Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013).

Na Tabela 3, apresenta-se a distribuição das classes de uso e ocupação da terra na BHAC e DIBAC, bem como os seus quantitativos, para o ano de 2021.

**Tabela 3.** Classes de uso e ocupação da terra na BHAC e DIBAC.

Classes	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
<b>Usos da Terra</b>		
Cultura Temporária	114,12	20,98
Pastagem	10,19	1,87
Silvicultura	18,98	3,49
<b>Coberturas da Terra</b>		
Florestal	57,21	10,52
Campestre	114,70	21,08
Corpo d'água Continental	17,45	3,21
Área Descoberta	211,34	38,85

Identificadas as classes de cada variável a ser analisada pela fragilidade ambiental potencial e

emergente, foi elaborada a Tabela 4 em que consta o grau de fragilidade atribuído, de acordo com a associação de metodologias já mencionadas.

**Tabela 4.** Classes das variáveis e seus respectivos graus de fragilidade para a BHAC e DIBAC.

Variáveis	Classes	Fragilidade
<b>Geologia</b>	Depósitos aluvionares	5 – Muito Alta
	Depósitos de barreira pleistocênica 3 – Depósitos de planície lagunar	5 – Muito Alta
	Depósitos de barreira pleistocênica 3 – Depósitos de praias e cristas lagunares	5 – Muito Alta
	Depósitos de planície de inundação	5 – Muito Alta
	Depósitos de planície lagunar	5 – Muito Alta
	Granitóides migmatizados	1 – Muito baixa
	Gnaisses granodioríticos	1 – Muito baixa
	Granito Arroio Grande	1 – Muito baixa
	Granito Chasqueiro	1 – Muito baixa
<b>Solos</b>	Argissolo Vermelho-amarelo Distrófico	3 – Média
	Espodossolos Indiscriminados	4 – Alta
	Gleissolo Háptico Ta Eutrófico	1 – Muito baixa
	Organossolo Tiomórfico Sáprico	5 – Muito Alta
	Planossolo Háptico Eutrófico	1 – Muito baixa
<b>Precipitação (mm/mês)</b>	125-150	2 – Baixa
<b>Índice de Dissecação do Relevo</b>	13, 23, 33, 43	3 – Média
	14, 24, 34, 44	4 – Alta
	15, 25, 35, 45	5 – Muito Alta
<b>Uso e Ocupação da Terra</b>	Cultura Temporária	4 – Alta
	Pastagem	4 – Alta
	Silvicultura	2 – Baixa
	Florestal	1 – Muito baixa
	Campestre	2 – Baixa
	Corpo d'água Continental	0 – Nula
	Área Descoberta	5 – Muito Alta

Fonte: Adaptado de Crepani *et al.*, (2001) e Ross (1994).

Para o mapeamento da fragilidade potencial, adotou-se a metodologia de Campos (2018), que utiliza as ferramentas *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e a análise multicritério *Weighted Linear Combination Model* (WLC) para a determinação dos níveis de fragilidade. O método AHP foi desenvolvido em 1978 e tem por função a atribuição de pesos para cada plano de informação, assim como, permite criar um nível de consistência para as comparações (Oliveira e Moreau, 2021).

A partir da matriz desenvolvida pelo método AHP, obteve-se os pesos para cada fator ambiental. Foi considerado o mesmo nível de relevância para cada variável ambiental (1),

obtendo-se o mesmo peso para cada, conforme apresentado na Tabela 5. No entanto, dentro de ambiente SIG, foi utilizada a álgebra de mapas, em que cada variável (geologia, solos, precipitação e índice de dissecação do relevo) foi multiplicada pelo seu peso. Anteriormente a este procedimento, todos os arquivos que estavam em formato de vetor foram convertidos em arquivos matriciais (*raster*). Posteriormente à determinação das classes de fragilidade, todos os arquivos passaram por um filtro majoritário. Ao final, almejando um *layout* esteticamente agradável, o arquivo final foi convertido para vetor.

**Tabela 5.** Matriz de comparação para a fragilidade ambiental potencial.

	Solo	Geologia	Dissecação	Precipitação	Pesos
Solo	1				0,25
Geologia	1	1			0,25
Dissecação	1	1	1		0,25
Precipitação	1	1	1	1	0,25

Fonte: Adaptado de Campos (2018).

Para o mapeamento da fragilidade ambiental emergente, também foi utilizado o método AHP. Porém, diferente da análise anterior, a variável uso e ocupação da terra foi adicionada, e também foi conferida uma importância superior a mesma. Já os fatores ambientais conservaram a mesma relevância entre si (Tabela 6). Outros autores também utilizaram peso superior para o fator uso e ocupação da terra, tais como Manfré et al. (2013) e Oliveira e Moreau (2021). A atribuição de maior peso para o fator uso e ocupação se dá pelo fato de que as ações antrópicas causam maior

impacto no meio ambiente, e de forma variável, a depender do seu uso. Já o impacto dos fatores ambientais é constante ao longo do tempo, ocasionando menor alteração e, assim, recebem menores pesos (Campos, 2018).

Assim como para a fragilidade potencial, foi realizada a álgebra de mapas em ambiente SIG, multiplicando cada variável pelo seu peso

A título de ilustração, apresenta-se no fluxograma (Figura 2), a metodologia adotada neste estudo.

**Tabela 6.** Matriz de comparação para a fragilidade ambiental emergente.

	Uso e Ocupação	Solo	Geologia	Dissecação	Precipitação	Pesos
Uso e Ocupação	1					0,4286
Solo	1/3	1				0,1429
Geologia	1/3	1	1			0,1429
Dissecação	1/3	1	1	1		0,1429
Precipitação	1/3	1	1	1	1	0,1429

Fonte: Adaptado de Campos (2018).

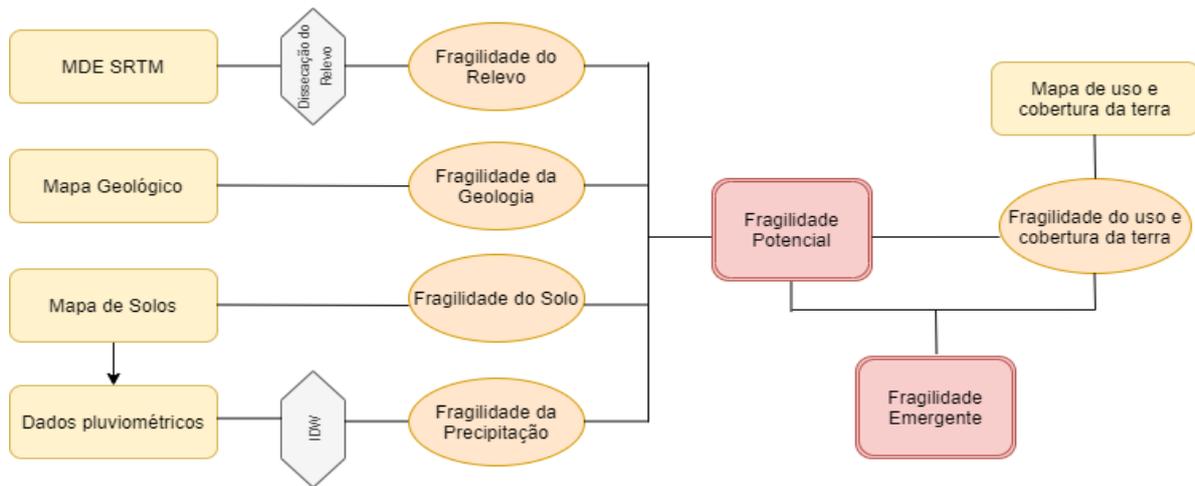


Figura 2. Fluxograma da metodologia utilizada no estudo de fragilidade da BHAC e DIBAC. Fonte: Adaptado de Campos (2018).

## Resultados e discussão

### *Fragilidade ambiental potencial*

Através da espacialização dos atributos inerentes ao ambiente natural, é possível determinar a fragilidade ambiental potencial, sendo uma ótima ferramenta para um planejamento ambiental adequado (Silva et al., 2020). A partir

das metodologias apresentadas, foi possível determinar a fragilidade ambiental potencial para a BHAC e DIBAC (Figura 3). Prontamente, na Tabela 7 apresenta-se a quantificação da área correspondente a cada classe de fragilidade, para todos os fatores.

**Tabela 7.** Área de distribuição para cada fator correspondente a fragilidade ambiental potencial na BHAC e DIBAC.

	<b>Fragilidade</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>
<b>Fragilidade da Geologia</b>	Muito baixa	272,46	50,08
	Muito alta	271,63	49,92
<b>Fragilidade do Solo</b>	Muito baixa	255,44	46,94
	Média	277,30	50,96
	Alta	6,19	1,14
	Muito Alta	5,18	0,96
<b>Fragilidade do Relevo</b>	Média	167,63	30,84
	Alta	363,13	66,81
	Muito Alta	12,78	2,35
<b>Fragilidade da Precipitação</b>	Baixa	544,1	100
<b>Fragilidade Ambiental Potencial</b>	Baixa	517,89	95,53
	Média	24,26	4,47

Fonte: Autores.

Em relação a fragilidade da geologia (Figura 3A), a classe predominante é a muito baixa (50,1%), correspondendo, em maior parte, a porção da BHAC, na medida em que os tipos de rochas predominantes são metamórficos e ígneos, caracterizadas pela resistência aos diversos tipos de intemperismos. Como essas rochas possuem maior resistência à erosão, devido ao seu grau de coesão, significando que há uma maior intensidade nas

ligações entre os minerais e as partículas que as constituem (Franco et al., 2011). Entretanto, na área do DIBAC, o grau de coesão das rochas não é intenso, na medida que são constituídos de sedimentos inconsolidados, representando uma situação preocupante por deter uma fragilidade geológica muito alta (49,9%), como observado na Figura 3A.

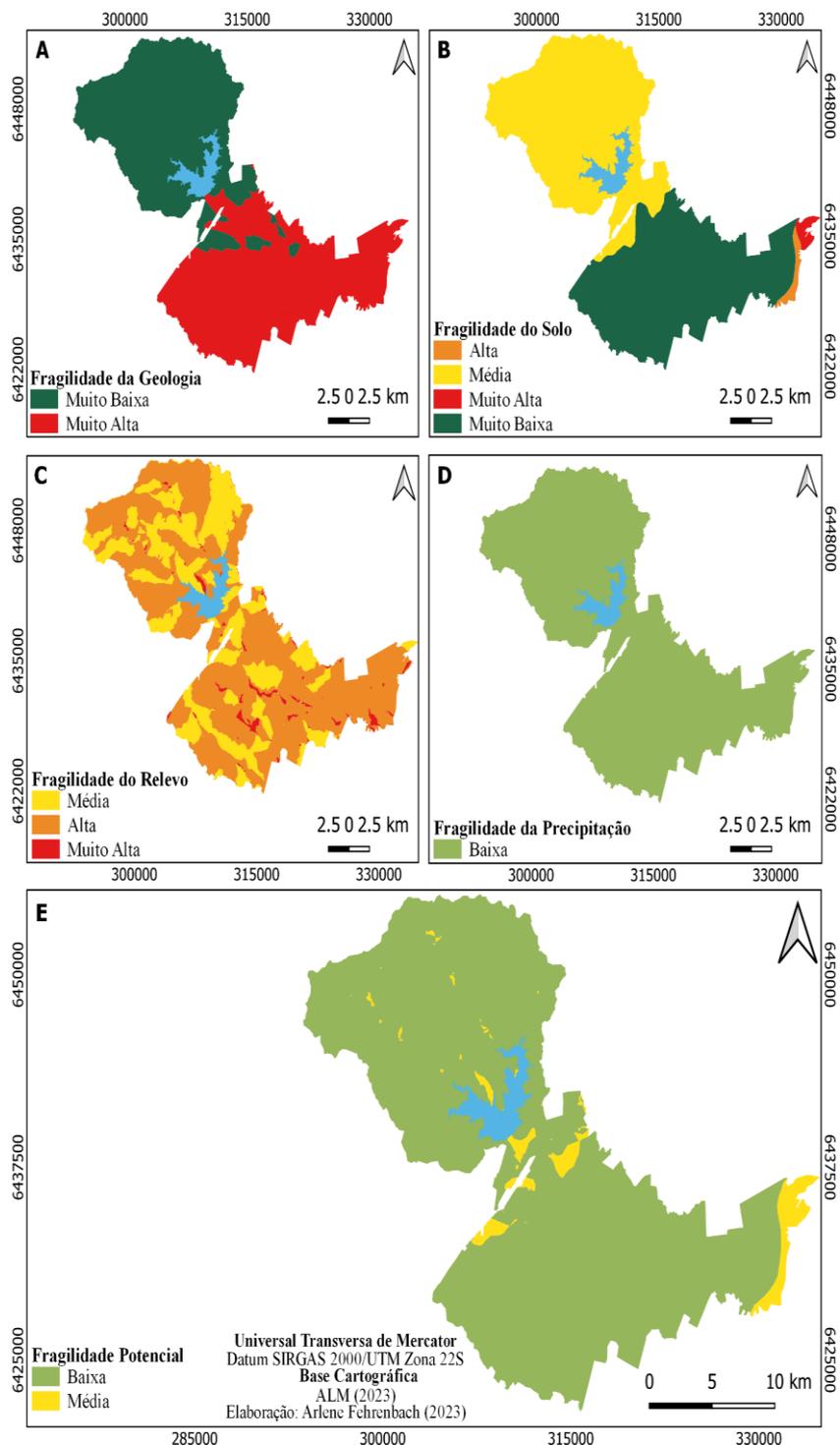


Figura 3. Distribuição espacial da fragilidade associada a (A) geologia, (B) pedologia, (C) relevo, (D) precipitação e (E) fragilidade ambiental potencial, na área em estudo.

Considerando a fragilidade associada ao solo (Figura 3B), a BHAC apresenta grau de fragilidade médio (51%), correspondendo a porção de ocorrência do Argissolo Vermelho-amarelo, demandando maiores cuidados com o manejo do solo. Demarchi e Zimback, (2014) mencionam que os Argissolos possuem maior susceptibilidade nas camadas superficiais de sofrerem processos erosivos, devido ao acúmulo de argila no horizonte B textural, por não propiciar o desenvolvimento radicular das plantas. Enquanto que, a maior parcela correspondente ao DIBAC possui fragilidade muito baixa (46,9%), onde predomina os solos do tipo Planossolo Háptico e Gleissolo Háptico, considerados mais consistentes e formados sob saturação de água. Contudo, próximo a Lagoa Mirim encontram-se os Organossolos e os Espodossolos, que são solos extremamente frágeis e necessitam de maiores cuidados quanto ao manejo. Tais solos foram classificados com fragilidade alta (1,1%) e muito alta (1%).

De acordo com a EMBRAPA (2018), os Organossolos são solos orgânicos e escuros, com presença de restos vegetais e formados quase que exclusivamente em condições de saturação de água, como é o caso da área deste estudo. Devido a essas características, estas classes acabam conferindo maior suscetibilidade a processos erosivos, especialmente a erosão hídrica. Já os Espodossolos são muito arenosos, com baixa fertilidade e baixa capacidade de retenção de água (EMBRAPA, 2018).

De acordo com Souza et al. (2020), os solos, como sistemas abertos e reflexos das interações ambientais, além de favorecerem o desenvolvimento de atividades produtivas, são excelentes indicadores da estabilidade ou instabilidade dos ambientes naturais. Cabe mencionar a importância do uso adequado do solo, uma vez que a erosão desencadeia a perda de toneladas de sedimentos todos os anos, causando o assoreamento dos cursos de água, além de reduzir a fertilidade e produtividade agrícola (Demarchi e Zimback, 2014).

Na Figura 3C, verifica-se a fragilidade associada ao relevo, determinada por meio do índice de dissecação do relevo (IDR), que constitui uma variável de grande importância na determinação da fragilidade ambiental (Guira, 2017). Constata-se que a BHAC e o DIBAC apresentaram uma situação semelhante, entre média (30,8%), alta (66,8%) e muito alta (2,4%), sendo faixas de atenção por ser um relevo dissecado.

O IDR colabora na interpretação da fragilidade ambiental, facultando o entendimento sobre a morfodinâmica e sobre a relação morfogênese-pedogênese no âmbito das bacias hidrográficas (Souza et al., 2020). Tendo em vista que grande parte da área possui alta dissecação do relevo (66,8%), é preciso ter atenção quanto a esse aspecto, na medida que topografias com forte dissecação estão relacionadas a solos frágeis, sujeitos a processos erosivos (Ross, 2012).

Destaca-se que em caso de remoção da vegetação destas áreas, os processos erosivos tendem a intensificar-se, exigindo maior atenção quanto ao uso do solo, sendo a declividade um dos fatores preponderantes para a ocorrência de erosão hídrica e movimentos de massa (Pessi e Loverde-Oliveira, 2019).

No que concerne a fragilidade relacionada à precipitação (Figura 3D), encontrou-se uma uniformidade em toda área de estudo, com baixa fragilidade ambiental (100%), associado ao regime pluviométrico, que em média não ultrapassa os limites de 136,3 mm/mês. Além disso, por ser uma área pequena, a região não apresenta grandes oscilações pluviométricas, isto é, apresenta um comportamento homogêneo, na distribuição das chuvas ao longo do ano. No entanto, mesmo a intensidade pluviométrica sendo baixa, é necessário levar em consideração outros fatores que podem desencadear processos erosivos, dentre eles, destaca-se a cobertura vegetal, uma vez que a erosão hídrica atua na desagregação das partículas do solo pela combinação do impacto das gotas de chuva associado a declividade potencializam o escoamento superficial (Santos Neto e Christofaro, 2019; Riquetti et al., 2022).

Finalmente, a fragilidade ambiental potencial (Figura 3E), sendo o produto de cada fator pelo seu peso, encontrando-se duas classes distintas: Baixa e Média. A classe baixa (95,5%) predomina na área de estudo, principalmente na porção da BHAC, o que está atrelado a geologia consolidada, com fragilidade mediana no tocante aos aspectos pedológicos e a baixa intensidade pluviométrica. A classe de fragilidade média corresponde a 4,5%, situada principalmente na área do DIBAC, onde a geologia é mais frágil, assim como os solos próximos à Lagoa Mirim, que são extremamente frágeis. No entanto, é possível afirmar que para haver um planejamento efetivo quanto ao uso e ocupação do solo, é necessário ter conhecimento dos aspectos físicos inerentes ao ambiente, para minimizar os processos de degradação (Benavides Silva e Machado, 2014).

Mesmo que a fragilidade natural varia de baixa a média, entende-se que a área apresenta um certo potencial de degradação, tal como, de transporte e deposição de sedimentos nos corpos hídricos. Neste contexto, torna-se necessário o manejo adequado da área, através da adoção de medidas conservacionistas do solo, visando o desenvolvimento sustentável da região. Estudos sobre práticas e manejo do solo destacam como

práticas conservacionistas mais recomendadas, o plantio em nível, terraceamento, plantio direto na palha, adequação da cultura ao tipo de solo, florestamento e reflorestamento, recomposição da mata ciliar, objetivando reduzir o efeito dos processos erosivos (Bertoni e Lombardi neto, 1990; EMBRAPA, 2003; Eduardo et al., 2013).

***Fragilidade ambiental emergente***

Seguindo o método apresentado, foi mapeada a fragilidade ambiental emergente para a BHAC e DIBAC (Figura 4), que une a fragilidade ambiental potencial e a fragilidade do uso e

ocupação do solo. Logo, na Tabela 8, apresenta-se a quantificação da área correspondente a cada classe de fragilidade.

**Tabela 8.** Área de distribuição para cada fator correspondente a fragilidade ambiental emergente na BHAC e DIBAC.

	<b>Fragilidade</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>
<b>Fragilidade Ambiental Potencial</b>	Baixa	517,89	95,53
	Média	24,26	4,47
<b>Fragilidade do Uso e Ocupação da Terra</b>	Muito baixa	57,21	10,52
	Baixa	133,68	24,57
	Alta	124,32	22,85
	Muito Alta	211,34	38,85
	Nula	17,45	3,21
<b>Fragilidade Ambiental Emergente</b>	Muito Baixa	65,84	12,16
	Baixa	155,91	28,80
	Média	314,95	58,18
	Alta	4,65	0,86

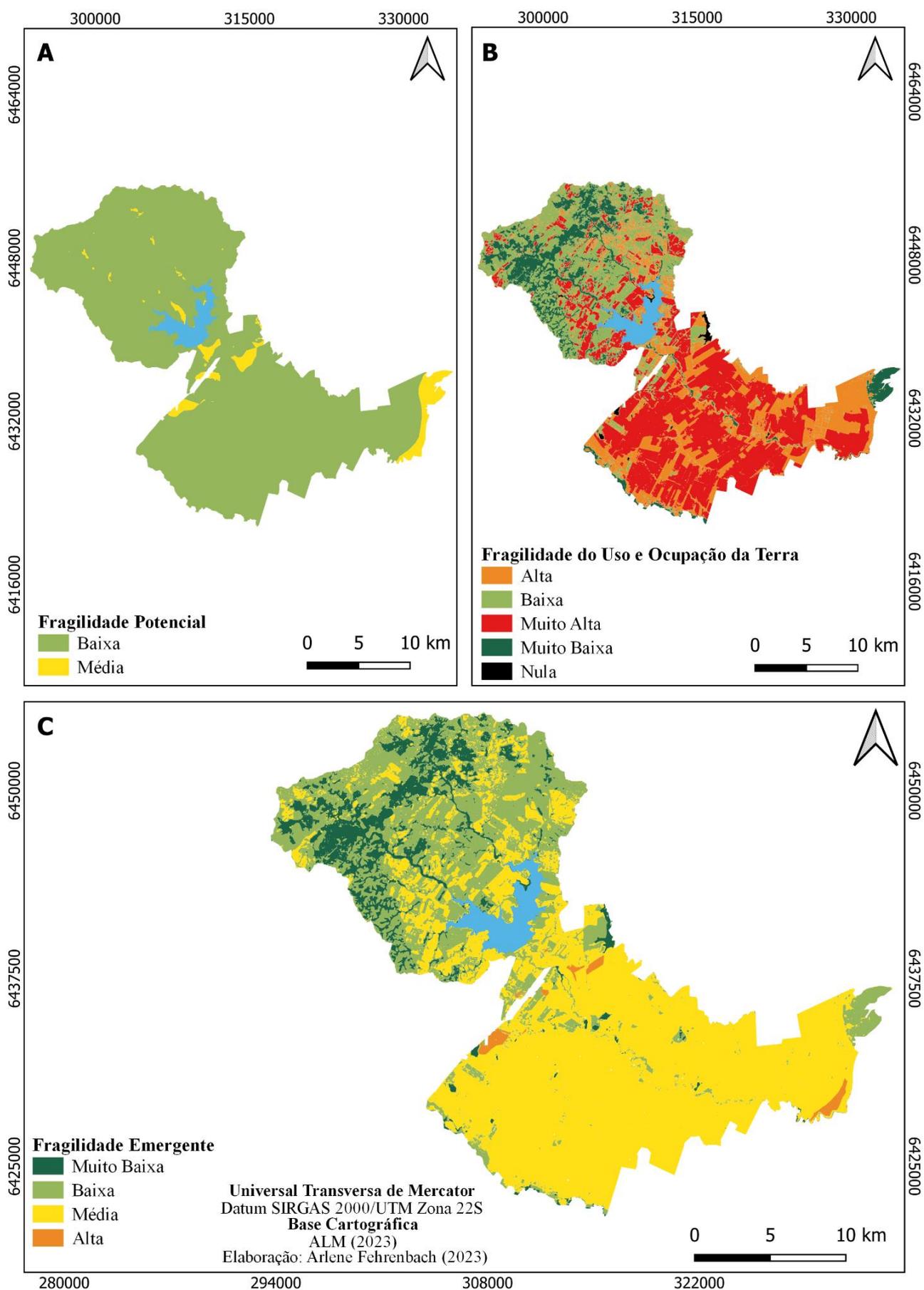


Figura 4. Distribuição espacial das fragilidades (A) ambiental potencial, (B) do uso e ocupação do solo e, (C) fragilidade ambiental emergente, todas na BHAC e no DIBAC.

Os resultados obtidos pelo mapeamento da fragilidade do uso e cobertura da terra (Figura 4B) retratam grandes áreas, principalmente aquelas correspondentes ao DIBAC, com níveis de fragilidade alta (22,9%) e muito alta (38,9%). Isso pode estar associado ao uso do solo para o plantio de arroz irrigado associado a solos naturalmente frágeis, isto é, propensos a erodir-se. Logo, as classes muito baixas (10,5%) e baixa (24,6%) se concentram na porção da BHAC, onde o uso predominante é pelas formações florestais e campestres, além da silvicultura. Tais resultados corroboram com o que Belato e Serrão (2019) afirmam, que, à medida que a vegetação de um ambiente específico se torna mais densa, o impacto de agentes externos sobre o solo tendem a diminuir. Ou seja, a cobertura do solo minimiza a intensidade dos processos erosivos, diminuindo a sua fragilidade. Consonante a isso, Sá et al. (2020), afirmam que a cobertura vegetal protege o solo da erosão e desertificação causado pelo impacto das chuvas e ação dos ventos, por esta razão tais áreas apresentam uma menor fragilidade inerente. Como Ross (1994) e Crepani et al. (2001), não mencionam os graus de proteção para as áreas com corpos d'água, essa classe foi classificada como de fragilidade nula, correspondendo a 3,2% da área total.

Por fim, foi mapeada a fragilidade ambiental emergente (Figura 4C), onde se verifica que a classe predominante é a média (58,2%), abrangendo maiormente a porção do DIBAC, associado ao uso do solo na área, com predomínio da cultura temporária, com destaque para o arroz irrigado, além da pastagem para pecuária. A classe com fragilidade alta (0,9%), também foi encontrada no DIBAC, principalmente nas áreas em que o solo se encontra descoberto para a agricultura, facilitando, por sua vez, a ocorrência de processos erosivos e o carreamento de sedimentos para os corpos hídricos. Logo, Vieira et al. (2021) relatam que áreas com fragilidade emergente, enquadradas nas classes de média a alta, necessitam de maior atenção quanto ao planejamento do uso e ocupação, na medida que a

mecanização do solo, além do manejo e cultivo irracional, promovem eventos danosos aos recursos ambientais, como assoreamento dos corpos hídricos, compactação do solo, supressão da vegetação nativa, dentre outros.

Na porção à montante do barramento, predomina a fragilidade baixa (28,8%) e muito baixa (12,2%), tendo em vista que nesta área ocorrem formações florestais e campestres, e uso para silvicultura, que protegem o solo de processos degradantes através da interceptação da água da chuva, além de manter a estrutura do solo por conta do não revolvimento constante do solo. A agregação do solo é muito importante para a sua conservação, na medida que influencia os processos de retenção de água e nutrientes, a atividade biológica, o desenvolvimento de raízes, dentre outros (EMBRAPA, 2018).

Tendo em vista a classificação da fragilidade para a área de estudo, esta se encontra sujeita a processos de degradação, tornando-se necessário uma gestão mais efetiva, bem como a adoção de práticas conservacionistas. Neste sentido, Costa Filho (2016), destaca no estudo dos impactos ambientais ocasionados pelas atividades potencialmente poluidoras na BHAC, a adoção de práticas de manejo conservacionista do solo nas atividades agrícolas, assim como a recomposição e preservação da mata ciliar, visando garantir a disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos.

Em suma, é importante destacar que a pesquisa resultante da detecção de impactos ambientais em avaliações de fragilidade ambiental tem o potencial de enriquecer a gestão de bacias, ao possibilitar a avaliação da compatibilidade ambiental com as atividades socioeconômicas. Com base nos resultados alcançados, é possível desenvolver planos de gestão adaptados à dinâmica local (Figueirôa e Salvio, 2020). Além disso, é importante frisar, como retratam Oliveira e Moreau (2021), que o estudo de fragilidade ambiental expõe a realidade presente, uma vez que considera o uso e ocupação do solo atual, sendo necessário refazer o estudo para a manutenção dos dados, bem como para o monitoramento ambiental.

## Conclusão

Este estudo sobre a fragilidade ambiental apresentou resultados satisfatórios, mostrando as áreas que merecem maior atenção, visando o desenvolvimento sustentável da região. Com isso, os mapas gerados possibilitaram compreender a dinâmica da área estudada, onde o mapeamento da fragilidade ambiental potencial indicou um baixo

nível de fragilidade para a área, estando atrelada basicamente a baixa intensidade pluviométrica, ao relevo suave ondulado e a formações rochosas e pedológicas consolidadas. Logo, a fragilidade ambiental emergente apresentou níveis mais elevados, principalmente na área correspondente ao DIBAC, estando atrelada ao uso e ocupação da

terra, pois é uma área amplamente utilizada para agricultura, em especial pela orizicultura.

Desta forma, a metodologia adotada demonstrou eficácia e eficiência ao cumprir com o objetivo da pesquisa, que consistiu em analisar os diversos graus de fragilidade ambiental potencial e emergente para a BHAC, bem como para o DIBAC, fornecendo bases para um efetivo planejamento e gestão dos recursos naturais.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Agência para o Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim

Ademais, a metodologia atendeu ao escopo do trabalho, evidenciando que através de estudos desta natureza é possível obter resultados que auxiliam na tomada de decisão, quanto a gestão do uso e cobertura do solo, visando a adoção de práticas conservacionistas do solo, voltadas a minimizar os impactos ambientais ocasionados pelas atividades agropecuárias tanto na BHAC, como no DIBAC.

(ALM) pela proposição do tema e suporte durante as etapas de desenvolvimento deste estudo.

### Referências

- ALM. Agência para O Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim, 2022. Banco de dados. Disponível em: <https://agencialagoamirim.com.br/~>. Acesso em: 13 mar. 2022.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22, 711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2018. Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 15 mar. 2022.
- Belato, L.S., Serrão, S.L.C., 2019. Aplicação da vulnerabilidade ambiental do município de Tomé-Açu, Estado do Pará. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais [online]*, 10, 131-145. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.001.0011>
- Braga, C.C., Cabral, J.B.P., Lopes, S.M.F., Batista, D.F., 2017. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do reservatório da UHE Caçu – Goiás. *Ciência e Natura* 39, 81-98. <https://doi.org/10.5902/2179460X26978>
- Bertoni, J., Lombardi Neto, F., 1990. Conservação do solo. São Paulo: Ícone.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral, 1986. Programa de Integração Regional. RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais. Folha SH. 22 Porto Alegre e parte das folhas SH. 21 Uruguaiiana e SI 22 Lagoa Mirim. Rio de Janeiro.
- Campos, J. A., 2018. Fragilidade ambiental e capacidade de uso da terra da bacia hidrográfica do rio Caratinga, MG. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Cavalcante, J. C., Lima, A. M. M., Silva, J. C. C., Holanda, B. S., Almeida, C. A., 2022. Fragilidade ambiental potencial e emergente da bacia do rio Mocajuba - PA. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15 (3), 1417-1433. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.3.p1417-1433>.
- COODIC. Cooperativa dos Proprietários do Distrito de Irrigação da Barragem do Arroio Chasqueiro, 2022. Dados Pluviométricos da Estação Arroio Chasqueiro. Disponível em: <http://coodic.com.br/dm.html>. Acesso em: 05 mar. 2022.
- Costa Filho, Afrânio das Neves, 2016. Análise dos impactos ambientais das atividades potencialmente poluidoras na bacia hidrográfica do arroio Chasqueiro. Dissertação (Mestrado em Manejo e Conservação do Solo e da Água) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas. <http://repositorio.ufpel.edu.br/handle/prefix/3212>
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Breve história da Terra, 2022. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/Breve-Historia-da-Terra-1094.html>. Acesso em: 29 abr. 2022.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2022. Mapa Geológico do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html>. Acesso em 24 fev. 2022.
- Crepani, E., Medeiros, J.S., Filho, P.H., Gallotti, T., Valdete, F., Cláudio, D., Faria Barbosa, C., José, S., Campos, D., 2001. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao

- ordenamento territorial. São José dos Campos: INPE.
- Demarchi, J.C., Zimback, C.R.L., 2014. Mapeamento, erodibilidade e tolerância de perda de solo na sub-bacia do Ribeirão das Perobas. *Revista Energia na Agricultura* 29, 102-114.  
<https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2014v29n2p102-114>
- Eduardo, E.N., Carvalho, D.F.de., Machado, R.L., Soares, P.F.C., Almeida, W.S.de., 2013. Erodibilidade, fatores cobertura e manejo e práticas conservacionistas em argissolo vermelho-amarelo, sob condições de chuva natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37, 796-803.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300026>
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2003. *Práticas de Conservação do Solo e Recuperação de Áreas Degradadas*. 1. ed. Rio Branco, Embrapa Acre.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2018. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. Brasília: Embrapa, Brasília.
- UFPEL. Universidade Federal de Pelotas. Estação Agroclimatológica de Pelotas. Normas Climatológicas do Município de Pelotas, 1971 – 2000 (mensais e anuais). Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/agrometeorologia/informacoes/clima-de-pelotas/>. Acesso em: 28 jan. 2022.
- FIGUEIRÔA, C. F. B., SALVIO, G. M. M., 2020. Análise da fragilidade da Área de Proteção Ambiental Alto Rio Doce, MG, Brasil. *Ciência Florestal*, 30 (4), 1008-1018. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509834294>
- Franco, G.B., Marques, E.A.G., Gomes, R.L., Chagas, C.S., Souza, C.M.P., Betim, L.S., 2011. Fragilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Almada – Bahia. *Revista de Geografia* 28, 187-205.  
<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/918308>
- Guimarães, F.S., Cordeiro, C.M., Bueno, G.T., Carvalho, V.L.M., Nero, M. A., 2017. Uma proposta para automatização do Índice de dissecação do relevo. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 18, 155-167.  
<https://doi.org/10.20502/rbg.v18i1.1163>
- Guira, A.P.M., 2017. *Novas contribuições no modelo de fragilidade ambiental à processos erosivos: estudo de caso aplicado ao perímetro urbano de Rondonópolis*. Mato Grosso. Dissertação (Mestrado em Geografia) Rondonópolis, Universidade Federal de Mato Grosso.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013. *Manual Técnico de Uso da Terra*, 3. ed. Rio de Janeiro.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2001. *Mapa de solos do Brasil*. Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=337420&biblioteca=vazio&busca=337420&qFacets=337420&sort=&paginaacao=t&paginaAtual=1>. Acesso em: 27 fev. 2022.
- Leal, J.V., Todt, V., Thum, A.B., 2013. O uso de SIG para monitoramento de áreas degradadas – Estudo de caso: App do Arroio Gil. *Revista Brasileira de Cartografia* 65, 967-983.  
<https://doi.org/10.14393/rbcv65n5-43874>
- Manfré, L.A., Da Silva, A.M., Urban, R.C., Rodgers, J., 2013. Environmental fragility evaluation and guidelines for environmental zoning: a study case on Ibiuna (the Southeastern Brazilian region). *Environmental Earth Sciences* 69, 947-957.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s12665-012-1979-2>
- Melo, O.A.G., Santos, M. L., 2010. Análise comparativa da vulnerabilidade ambiental potencial ou emergente da bacia hidrográfica do rio Baiano – Assis Chateaubriand/PR. *Boletim Geográfico* 28, 17-27.  
<https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v28i2.10375>
- Oliveira, E.S., Moreau, A.M.S.S., 2021. Fragilidade ambiental da Península de Maraú – Bahia. *Revista de Geografia* 38, 481-500.  
<https://doi.org/10.51359/2238-6211.2021.250818>
- Oliveira, L.F.C., Fioreze, A.P., Medeiros, A.M. M., Silva, M.A.S., 2010. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 14, 1186-1192.  
<https://doi.org/10.1590/S1415-43662010001100008>
- Pessi, D., Loverde-Oliveira, S.M., 2019. Aplicação da análise geoespacial para caracterização da fragilidade de terrenos. *Revista de Geografia* 36, 243-260. <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2019.238451>
- Pinsky, V., Kruglianskas, I., 2017. Inovação tecnológica para a sustentabilidade: aprendizados de sucessos e fracassos. *Estudos Avançados*, 31, 107-126.  
<https://doi.org/10.1590/s0103-40142017.3190008>

- Riquetti, N.B., Mello, C.R., Leandro, D., Guzman, J.A., Beskow, S., 2022. Assessment of the soil-erosion-sediment for sustainable development of South America. *Journal of Environmental Management*, 321, 115933. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115933>
- Ross, J.L.S., 1994. Análise empírica da fragilidade de ambientes naturais e antropizados. *Geography Department, University of São Paulo* 8, 63-74.
- Ross, J.L.S., 2012. Landforms and environmental planning: potentialities and fragilities. *Revista do Departamento de Geografia - USP, volume especial de 30 anos*, 38-51. <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0112.0003>
- Sá, L.N., Leite, J.P.A., Filho, G.B.R., 2020. A importância da cobertura vegetal no processo de erosão e degradação do solo no ensino de geografia. *International Journal Education and Teaching* 3, 173-188. <http://dx.doi.org/10.31692/2595-2498.v3i3.151>
- Santos Neto, J.R., Christofaro, C., 2020. Erosividade da Chuva na bacia hidrográfica do rio Araçuaí-MG. *Boletim de Geografia* 37, 40-50. <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v37i3.37522>
- Silva, K.N., Ferreira, E.C., Loureiro, G.E., 2021. Fragilidade ambiental da sub-região hidrográfica Itacaiúnas (SRHI). *Research, Society and Development* 10, 1-21. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i3.13215>
- Silva, T. A., Duarte, M.L., Gato, L.C., Guandique, M.E.G., 2020. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do rio Candeias, RO. *Journal of Environmental Analysis and Progress* 5, 58-68. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.1.2020.2702.058-068>
- Simon, A.L.H., Felipim, T., Lopes, A.L.O., 2017. Bacia do Arroio Chasqueiro (RS): Alterações morfohidrográficas vinculadas à dinâmica de cobertura e uso da terra. *Revista do Departamento de Geografia*, 278-286. <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.132730>
- Spörl C., 2007. Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.8.2007.tde-10102007-145640>
- Souza, D. S.L., Dellargine, F. L., Mira, Í. R. C., Silva, G. T .G, Silva, M. L., 2020. Análise e Mapeamento da Fragilidade Ambiental no Município de Inconfidentes – MG. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13 (5), 2269-2292. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.5.p2269-2292>.
- Tagliani, C.R.A., 2003. Técnica para avaliação da vulnerabilidade ambiental de ambientes costeiros utilizando um sistema geográfico de informação. In: *Seminário Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 11, 2003, Belo Horizonte. *Anais, São José dos Campos, INPE*, 1657-1664.
- Tricart J., 1977. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: SUPREN/IBGE. Disponível em: <http://repositorio.furg.br/handle/1/3113>.
- Valle, I.C., Francelino, M.R., Pinheiro, H.S.K., 2016. Mapeamento da fragilidade ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. *Floresta e Ambiente* 23, 295-308. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.107714>
- Vargas, T., Gomes, M.G., Belladonna, R., Adami, M.V.D., 2018. Aplicação do Interpolador IDW para Elaboração de Mapas Hidrológicos Paramétricos na Região da Serra Gaúcha. *Scientia cum Industria* 6, 38-43. <http://dx.doi.org/10.18226/23185279.v6iss3p38>
- Vidal, R.S., Gonçalves, G.M.S., Bartels, G.K., Boeira, L.S., Collares, G.L., 2021. Distrito se Irrigação da Barragem do Arroio Chasqueiro: Importância Histórica. *Anais do VIII Congresso de Extensão e Cultura da UFPel*. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/congressoextensa>
- Vieira, R. S., Ferreira, E. P., Rolim Neto, F. C., Oliveira, E. M., Braga, S. E., 2021. Fragilidade ambiental emergente da bacia hidrográfica do rio Santa Maria do Doce – ES, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14 (3), 1253-1267. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/249403>.