

Fragilidade ambiental: Uso da Análise Hierárquica Ponderada na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí - RS

Environmental fragility: Use of the Analytic Hierarchy Process in the Vacacaí River Basin – RS - Brazil

Fragilidad ambiental: uso del Análisis Jerárquico Ponderado en la cuenca del río Vacacaí - Brasil

João Victor Bergamo de Siqueira ¹, Giorge Gabriel Schnorr ² e Anderson Augusto Volpato Scotti ³

¹ Universidade Federal Fluminense, PPG UFF, Campo dos Goytacazes, Brasil. joavictorbergamosiqueira@hotmail.com.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5813-3768>

² Universidade Federal de Santa Maria, PPGGEO UFSM, Santa Maria, Brasil. giorgeSchnorr@gmail.com.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7305-872X>

³ Universidade Federal de Santa Maria, Geociências, Santa Maria, Brasil. Anderson.sccoti@ufsm.br.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8667-0432>

Recebido: 21/11/2024; Aceito: 05/12/2024; Publicado: 26/12/2024.

Resumo: A apropriação da natureza por parte dos seres humanos vem crescendo constantemente com o passar dos anos, para fins de aumento de produção agropecuária e urbanização, essa ação reduz as áreas em equilíbrio dinâmico. Assim, o manejo adequado das formas de ocupação antrópica é estratégico para fins de planejamento espacial afim de fomentar um desenvolvimento sustentável. Esse trabalho tem por objetivo propor um mapa de fragilidade ambiental para a Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí. A metodologia é baseada no uso das geotecnologias associadas a Análise Hierárquica Ponderada. Os resultados obtidos demonstram que as áreas de menor fragilidade se localizam na porção sul da BHRV e as porções de Fragilidade Muito Alta, estão localizadas no centro e no norte. Dessa forma, as considerações dos estudos ambientais e do uso das metodologias de ponderação, permitiram conhecer e analisar de maneira minuciosa as condições de fragilidade na área de estudo.

Palavras-chave: Análise Ambiental; Geoprocessamento; Bacia Hidrográfica; Ponderação.

Abstract: The appropriation of nature by man has been growing steadily over the years, for the purpose of increasing agricultural production and urbanization, reducing areas of natural vegetation. Therefore, the proper management of forms of anthropic occupation is strategic for spatial planning purposes, so that sustainable development is fostered. This work aims to propose a map of environmental fragility for the Vacacaí River Basin. The methodology is based on the use of geotechnologies associated with the Analytic Hierarchy Process. Results obtained demonstrate that the areas of lower fragility are located in the southern portion of the BHRV and the portions of Very High Fragility are located in the center and north. In this way, the considerations of environmental studies and the use of weighting methodologies, allowed to know and analyze in detail the fragile conditions in the study area.

Keywords: Environmental Analysis; Geoprocessing; Watershed; Weighting.

Resumen: La apropiación de la naturaleza por parte del hombre ha estado creciendo constantemente a lo largo de los años, con fines de aumento de la producción agropecuaria y urbanización, disminuyendo así las áreas de vegetación natural. Por lo tanto, el manejo adecuado de las formas de ocupación antrópica es estratégico para los fines de planificación espacial,

fomentando un desarrollo sostenible. Este trabajo tiene como objetivo proponer un mapa de fragilidad ambiental para la Cuenca Hidrográfica del Río Vacacaí. La metodología se basa en el uso de geotecnologías asociadas al Análisis Jerárquico Ponderado. Los resultados obtenidos demuestran que las áreas de menor fragilidad se encuentran en la porción sur de la BHRV, mientras que las áreas de Fragilidad Muy Alta están localizadas en el centro y en el norte. De esta manera, las consideraciones de los estudios ambientales y el uso de metodologías de ponderación permitieron conocer y analizar de manera detallada las condiciones de fragilidad en el área de estudio.

Palabras clave: Análisis Ambiental; Geoprocusamiento; Cuenca Hidrográfica; Ponderación.

1. Introdução

A apropriação da natureza por parte do homem vem crescendo constantemente com o passar dos anos, para fins de aumento de produção agropecuária e urbanização, diminuindo as áreas de vegetação natural. Tendo em vista que os processos de ocupação também ocorrem em áreas ambientalmente vulneráveis, surge o conceito de fragilidade ambiental. Nesse contexto, a fragilidade ambiental corresponde a suscetibilidade do ecossistema às mudanças no próprio equilíbrio dinâmico a partir das suas características (ANJINHO et al., 2021).

Nesse sentido, as geotecnologias tornam-se também ferramentas que buscam encontrar alternativas que predizem áreas sujeitas ao desencadeamento de processos erosivos, mudanças no uso e cobertura da terra e contaminação de águas subterrâneas e superficiais, as soluções associadas as geotecnologias buscam minimizar os impactos decorrentes desses fenômenos, assim como o mapeamento das áreas já afetadas (GUERRA; JORGE, 2013). Rosa (2005, pág. 1) salienta que “as geotecnologias são compostas por soluções em *hardware*, *software* e *peopleware* que juntos constituem poderosas ferramentas para tomada de decisões”. Assim, possibilita-se mapeamento e monitoramentos de processos erosivos, geração de modelos digitais, e análises de imagens de satélite. Logo, se tem a possibilidade de trabalhar os dados de forma automatizada em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), como pode ser observado nos trabalhos de Robaina et al. (2017); e Da Silveira et al. (2018).

Nesse contexto, a Análise Hierárquica Ponderada elaborada por Saaty (1986; 1991), surge como uma técnica que visa auxiliar na identificação de fragilidades com graus de influência variado (ROBAINA et al., 2022). Segundo Silva e Nunes (2009) o modelo hierárquico de Saaty (1980) se baseia na lógica de comparação par a par - *pairwise comparison* - onde são organizados hierarquicamente diferentes fatores que vem a influenciar na tomada de decisão, tais fatores são comparados entre si e lhes é atribuído um valor de importância relativa com base em uma escala pré-definida que diz respeito a intensidade que um fator predomina perante o outro.

Nesse contexto, cita-se o trabalho desenvolvido por Caldas et al. (2019) que realiza um estudo de suscetibilidade à erosão através de uma análise multicritério, com dados físicos utilizando a metodologia da Análise Hierárquica Ponderada (AHP), em uma bacia hidrográfica do estado do Rio de Janeiro; Lira et al. (2022) utilizam da AHP para classificação da fragilidade ambiental em uma bacia hidrográfica no estado do Paraná; Já Robaina et al. (2022), utilizaram a AHP para realização de um zoneamento de suscetibilidade e desenvolvimento de erosões lineares profundas na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria - RS.

Portanto, este tipo de abordagem permite identificar áreas prioritárias à implementação de práticas de manejo e conservação, contribuindo para o planejamento ambiental e a mitigação de impactos causados por atividades antrópicas. O presente trabalho tem por objetivo utilizar a AHP para análise de fragilidade ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí (BHRV), considerando características de uso da terra, solo, geologia, hipsometria e declividade, visando a indicação dos diferentes níveis de fragilidade ambiental.

A área de estudo se localiza no Centro-Oeste do Rio Grande do Sul e abrange um total de 11 municípios (Figura 1). Se localiza na região hidrográfica da Bacia do Guaíba, abrangendo as províncias geomorfológicas da Depressão Central e Escudo Rio-Grandense, na porção centro-ocidental do Rio Grande do Sul.

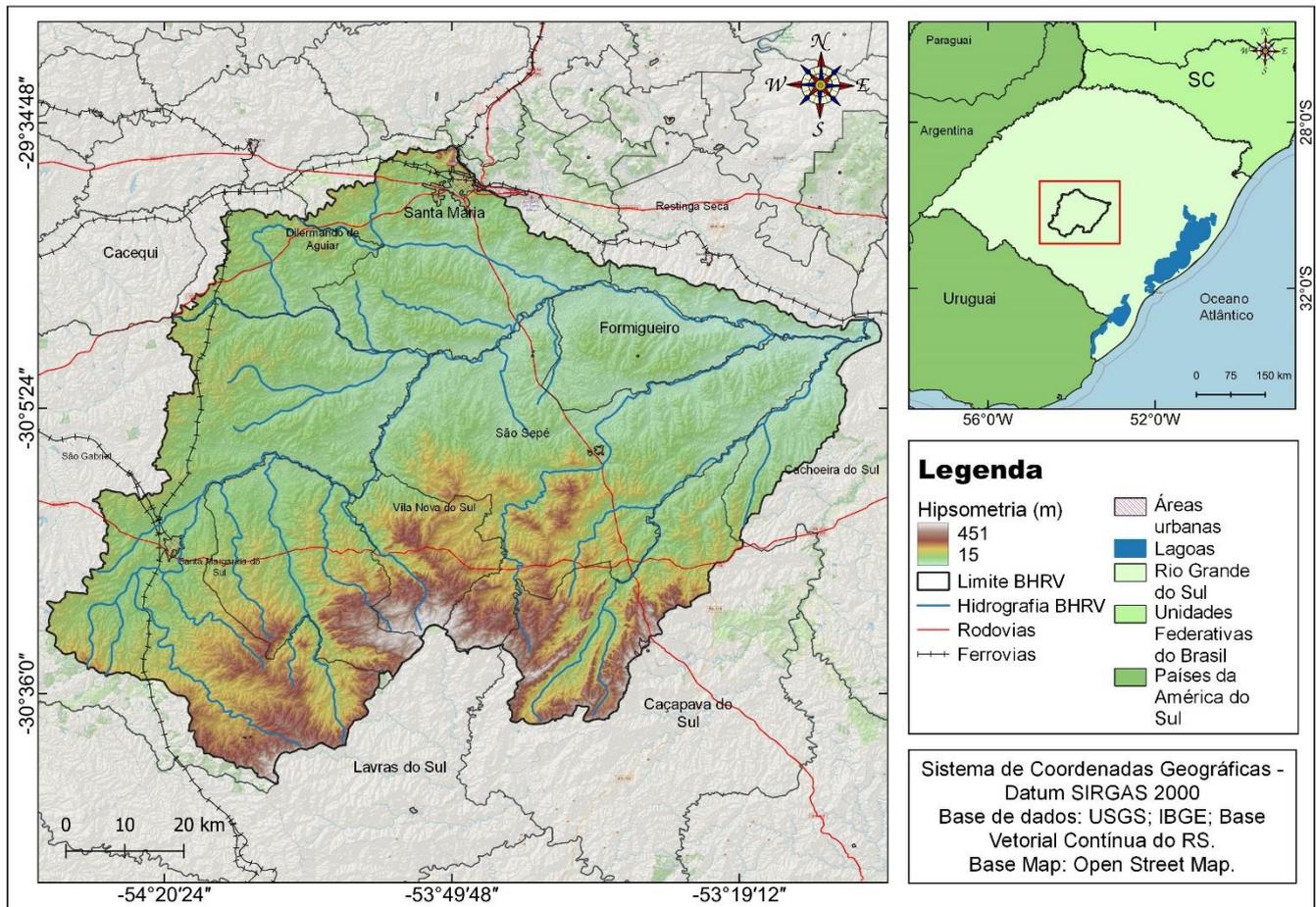


Figura 1. Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-RS. Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

2. Materiais e Métodos

O presente trabalho discute a fragilidade ambiental como base em 5 variáveis: declividade, hipsometria, geologia, solo e uso da terra. As características analisadas foram a maior ou menor inclinação das vertentes, energia do relevo (baseada na amplitude e altitude da BHRV), características físicas e vulnerabilidade erosiva dos solos, os padrões texturais, coesão e os tipos de rocha e, por fim, os tipos de uso da terra e as modificações ocasionadas pela atuação antrópica mais incisiva.

2.1. Levantamento e organização dos dados

As informações cartográficas da rede de drenagem em formato *shapefile* foram extraídas da Base Vetorial Contínua do RS na escala de 1:50.000, organizada por Hasenack e Weber (2010). Os dados morfométricos (informações relacionadas a hipsometria e declividade) foram calculados com base em imagens do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), obtidos do Serviço Geológico dos Estados Unidos - USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). A partir disso, extraiu-se um Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 30 metros (1 *arc second*).

Os dados referentes aos limites dos municípios, que ocupam em parte ou totalmente a BHRV, foram obtidos do site do IBGE na aba “portal de mapas”. E em relação aos dados de geologia e solo, baseou-se na classificação do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2008). A classificação do uso e cobertura da terra se deu por método supervisionado com base em uma imagem de satélite Sentinel, de 26 fevereiro de 2021, obtidas no *site* LandViewer (<https://eos.com/landviewer/?lat=-30.07936&lng=-52.97333&z=9>), a qual representa um mês de verão, onde os cultivos temporários encontram-se em estágio vegetativo de maturidade, reduzindo a correlação com eventuais processos erosivos e depósitos fluviais, que poderiam ser confundidos com solo exposto. A validação da classificação ocorreu por meio do uso do plugin do QGIS *Acamata* e com informações coletadas *in loco*.

Os processamentos digitais, bem como o banco de dados foram organizados e gerenciados no *software* QGIS versão 3.16.16. Utilizando as ferramentas de correção de geometria; normalização; dissolver; e de conversão de

vetor para raster. A organização das informações em bancos de dados também possibilitou menor margem de erros de processamento, bem como melhor organização e tempo de processamento das mesmas.

2.2. Definição de fragilidade ambiental

Foram atribuídos os valores ponderados de 0 a 1 para o grau de fragilidade, obtidos por meio do autovetor (SAATY, 1994). As áreas com valores próximos a 1 apresentam fragilidades mais acentuadas (de acordo com o tema). Nessas áreas, as alterações em ambientais são mais incisivas, enquanto aquelas áreas com valores próximos a 0, apresentam menor fragilidade, ou seja, as condições ambientais encontram-se em equilíbrio. O conceito de fragilidade ambiental, utilizado nesse trabalho, considera as publicações de Ross (1994), Gouveia e Ross (2019), Teixeira et al. (2021).

Destaca-se, que para esse trabalho, ao apresentar uma proposta de mapeamento de fragilidade ambiental, além dos aspectos ligados ao predomínio da morfogênese, são discutidas outras formas de alteração ambiental, como uso de insumos agrícolas e a probabilidade de alteração da vegetação endêmica. A ideia da proposta não é sugerir a restrição de formas de uso da terra, mas sim trazer a lume, aspectos devem ser considerados nas ações antrópicas sobre meio, contribuindo, com o desenvolvimento sustentável.

2.3. Classificação e Ponderação dos dados

Antes da aplicação da matriz pareada com os critérios/temas (Hipsometria, Declividade, Geologia, Tipos de solo e Uso e Cobertura da Terra), foram atribuídos valores lineares e arbitrários entre 0 e 1 para cada uma das classes dos temas utilizados. Esses valores foram baseados em características, como: energia do relevo (maior altitude e maior inclinação), propriedades geomorfológicas das rochas, mudanças na cobertura natural e uso de insumos agrícolas e suscetibilidade erosiva de solos. Os valores foram definidos com base no conhecimento dos autores e em fontes bibliográficas, dentre as quais estão: Dotto, Gaberti e Robaina, 2023; Wildner et al. 2008; Fonseca, Cirolini e Bruch (2023); Robaina et al. (2022); Soares Junior (2020); Colares et al. (2022); Schnorr, Scoti e Petsch (2021).

Para os temas hipsometria e declividade, foram atribuídos de maneira linear os valores decimais entre 0 e 1, onde pesos próximos a 1 representam as áreas com maiores altitudes e inclinação das vertentes. Essas áreas se configuram por apresentar, na BHRV, um maior gradiente de aceleração dos fluxos de matéria e energia.

Os valores atribuídos para a geologia da área de estudo foram baseados nas características das formações geológicas, como tipo de rocha, material constituinte, presença de diaclases, fraturas, grau de massividade e coesão (Tabela 1). Além das informações geológicas contidas no mapa, os trabalhos de campo possibilitaram a visualização *in loco* de alguns afloramentos. A porção da BHRV que drena o Escudo Sul-rio-grandense está inserida em uma área com diversidade grande de Formações Geológicas, com base nisso, como as propriedades analisadas são similares optou-se por unir em uma única classe essas formações geológicas.

Tabela 1. Escala de ponderação de suscetibilidade erosiva de geologia. Fonte: Organizado pelos autores (2024).

Classe geológica	Valor atribuído
Escudo RS	0,2
Serra Geral	0,2
Formação Botucatu	0,3
Formação Estrada Nova	0,4
Formação Irati	0,4
Formação Rio do Rastro	0,4
Formação Santa Maria	0,6
Formação Sanga do Cabral	0,7

Formação Caturrita	0,7
Formação Pirambóia	1

Já o solo foi analisado a partir do valor de ponderação atribuído a cada classe, em relação à suscetibilidade erosiva de cada tipo de solo, para fins de análise de parâmetros erosivos. Os valores atribuídos foram baseados nas características físicas dos solos (Tabela 2). Os planos solos, por localizarem-se em porções com topografia mais plana, receberam o melhor valor, os neossolos, pelas suas características física, de perfil pouco desenvolvido e rico em matéria orgânica e ainda estar associados a áreas pouco atrativas para a instalação de cultivos comerciais, receberam um valor intermediário e os argissolos, por estarem associados, em geral, as áreas de colinas, foram indicados como os mais suscetíveis.

Tabela 2. Escala de ponderação de suscetibilidade erosiva do solo. Fonte: Organizado pelos autores (2024).

Classes de tipologia de solo	Valor atribuído
Planossolos	0,2
Neossolos	0,5
Argissolos	0,8

O uso da terra foi analisado a partir do valor de ponderação atribuído a cada classe, em relação à fragilidade. Os valores atribuídos foram baseados nas características da cobertura da terra e da intervenção antrópica, interpretados com base nas características observadas na BHRV e no conhecimento da área (Tabela 3). Os tipos de uso com maior dinamismo de maquinários e com uso de insumos agrícolas, receberam os maiores valores, as aquelas áreas onde o permanece as coberturas naturais, receberam os menores valores. As áreas urbanas não foram consideradas nesse estudo, pois além de estarem com baixíssimo grau de detalhe, visto a escala de trabalho, possuem fragilidades específicas, as quais podem ser tema de estudos futuros.

Tabela 3. Escala de ponderação de suscetibilidade erosiva para o uso da terra. Fonte: Organizado pelos autores (2024).

Classes de uso da terra	Valor atribuído
Rochas expostas	0,1
Floresta	0,2
Campo	0,4
Silvicultura	0,5
Lavoura	0,9
Solo exposto	1

2.4. Utilização da Análise Hierárquica Ponderada (AHP)

A AHP, utilizado por Saaty (1991), mostrado no Quadro 1, representa um julgamento ou a comparação pareada entre dois elementos que estão no mesmo par. A escala numérica de comparação, varia de 1 a 9, com 1 significando a indiferença de importância de um critério em relação ao outro, e 9 significando a extrema importância de um critério sobre outro, com estágios intermediários de importância – em geral representados pelos valores 3, 5 e 7, entre esses níveis 1 e 9.

Esses julgamentos são representados em uma matriz pareada, na qual os elementos são comparados (SAATY, 1994). Para completar a matriz são necessários $n = (n - 1) / 2$ julgamentos para uma matriz $n \times n$, sendo n o número de linhas e colunas. Segundo Silva (2007), uma das formas de atribuição do nível de importância de um fator sobre

o outro está relacionado a decisão de um analista ou grupo de analistas que possua domínio na área. A análise hierárquica ponderada, pode ser utilizada para diferentes fins.

Quadro 1. Quadro de comparação de critérios.

Valor	Definição	Explicação
1	Igual importância	Os dois critérios contribuem de forma idêntica para o objetivo
3	Pouco mais importante	A análise e a experiência mostram que um critério é um pouco mais importante que o outro
5	Muito mais importante	A análise e a experiência mostram que um critério é claramente mais importante que o outro
7	Bastante mais importante	A análise e a experiência mostram que um dos critérios é predominante para o objetivo
9	Extremamente mais importante	Sem qualquer dúvida um dos critérios é absolutamente predominante para o objetivo
2, 4, 6, 8 Valores recíprocos dos anteriores	Valores intermediários	Também podem ser utilizados

Após a elaboração da matriz ponderada obtêm-se o cálculo dos pesos normalizados (vetor de prioridades) para cada critério, calculando-se a média dos valores de cada linha da matriz ponderada. São esses pesos normalizados que indicam, ao tomador de decisão, quais elementos devem ter maior importância (hierarquia). O Quadro 2 apresenta os procedimentos para obtenção da consistência dos valores de ponderação.

Quadro 2. Procedimentos para obtenção da consistência dos valores de ponderação. Fonte: Robaina et al. (2022); adaptado de Saaty (1994).

Índice	Descrição	Equação
Autovetor (Av)	É o valor normalizado de cada variável. Sendo a soma dos pesos da variável, dividido pela soma total (b)	$Av=a/b$
Número de critérios (N)	Número inteiro que representa o total de critérios utilizados (N)	$Pv= \text{matriz multi. (linha matriz} \cdot Av)$
Produto vetorial (Pv)	Multiplicação de matriz, aplicada entre a linha dos pesos de cada variável e a coluna de autovetor (Av)	$Pv= \text{matriz multi. (linha matriz}/Av)$
Lambda λ	Valor obtido da divisão do produto vetorial (Pv) pelo autovetor (Av)	$\lambda=Pv/Av$

Lambda máximo $\lambda_{\text{máx}}$	É a média dos valores de λ	$\lambda_{\text{máx}} = \text{média do } \lambda$
Índice de consistência (Ic)	É uma relação entre o lambda máximo e o número de variáveis	$Ic = (\lambda_{\text{máx}} - N) / (N - 1)$
Índice Randômico (IR)	Valor tabelado que varia conforme o número de critérios da matriz (n)	Tabela 2
Razão de consistência (RC)	O valor obtido através da divisão do índice de consistência (Ic) pelo Índice Randômico (IR)	$RC = Ic / IR$

Para atribuir a priorização pela técnica AHP é necessário calcular a matriz ponderada, sendo que, para tanto, cada elemento da coluna é dividido pela soma dos valores da própria coluna. Os valores obtidos a partir deste procedimento fazem com que a soma de cada coluna seja igual a um (1).

A avaliação dos julgamentos é feita pelo cálculo do Índice de Consistência (IC) e a Razão de Consistência (RC). O IC mede a coerência dos julgamentos, sendo que quanto mais próximo o índice estiver de zero, maior será a consistência global da matriz de comparação.

A RC indica a confiabilidade do julgamento dos especialistas. Se as condições fixadas na AHP não forem atendidas, é necessário refazer os julgamentos, ou então descartar a avaliação. O IC é calculado a partir do lambda máximo (λ_{max}) e o número de critérios analisados. De acordo com Saaty (1991), o lambda, é resultante do Auto Vetor médio dos índices (λM), calculado pela multiplicação da matriz de julgamentos (A) pelo vetor de prioridades (w), dividindo-se o resultado obtido (Aw), pelo vetor de prioridades (w).

A RC é obtida pela divisão do IC pelo Índice Randômico (IR) do AHP, definido em função do número (n) de elementos comparados, segundo Saaty (1994), como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4. Valores recalculados de IR, segundo versão proposta por Saaty. Fonte: Adaptado de Saaty (1994).

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0,5	0,8	1,1	1,2	1,3	1	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	2	9	1	5	5	4	5	9	1	4	6	7	8

Assim, para geração do mapa de fragilidade ambiental da BHRV, foram interpoladas as camadas em um modelo raster de cada variável gerada anteriormente, com os valores de fragilidade atribuídos a cada classe, na calculadora raster. Posteriormente, os arquivos em formato raster foram reclassificados e convertidos para vetor, para o cálculo da área de cada uma das classes e corrigida a geometria das respectivas camadas. Posteriormente no software QGIS, através da ferramenta “dissolver” foi atribuído um grau de importância para cada classe (muito baixa, baixa, média, alta e muita alta).

3. Resultados e Discussão

A hipsometria, junto com a declividade estão, diretamente, ligadas a energia do relevo, quanto maior a altitude maior a fragilidade, pois as possibilidades das ocorrências de processos morfogenéticos mais incisivos é mais considerável. No tema declividade, é considerada o gradiente de inclinação das vertentes, sendo que quanto maior a inclinação do terreno, maior fragilidade, considerando que nessas porções predominam processos morfogenéticos importantes para a erosão e os movimentos gravitacionais de massa

Analisando as variáveis (Figura 2), observa-se que para o tema geologia, as rochas com maior fragilidade, estão localizadas na porção central e norte da BHRV, essa área é composta por rochas sedimentares (GODOY et al. 2018), porosas e permeáveis, ou seja, representam importantes setores de recarga de água subterrânea, além de apresentarem menor resistência a meteorização, quando comparadas as rochas cristalinas que afloram na porção sul na BH, as quais apresentam maiores graus de coesão e massividade.

Para o tema solos, podemos observar que os solos mais suscetíveis a erosão, estão localizados na porção central da BH, são classificados como Argissolos, ocupam porções de relevo colinoso, amplamente utilizado para a agricultura e pecuária. Os Planossolos ocupam porções menos declivosas da BH, estão associados a planícies de inundação do Rio Vacacaí e seus principais tributários. Os Neossolos Litólicos, localizados principalmente na porção sul da BH, são solos de perfil pouco desenvolvido e na área de estudo ocupam porções escarpadas e o topo de relevos residuais.

Para o tema uso da terra, consideramos que aqueles tipos de uso mais antropizados, são os que apresentam a maior fragilidade, pois as ações humanas de modificação dos fluxos de matéria e energia são mais nocivas. As áreas de maior fragilidade estão relacionadas as áreas de lavoura, pelo uso excessivo de insumos, o que ocasiona perda de biodiversidade. As áreas de campo, quando utilizadas de maneira inadequada, também apresentam alta fragilidade, considerando que existe uma redução na vegetação endêmica e com isso, uma perda maior de solo. (SILVA, 2023).

Na Figura 2 é possível visualizar o esquema utilizado para definição do mapa de fragilidade ambiental. Destacasse que as áreas representadas em cores frias representam polígonos onde o peso atribuído foi baixo e as áreas com cores quentes são as que receberam maior peso na ponderação por tema.

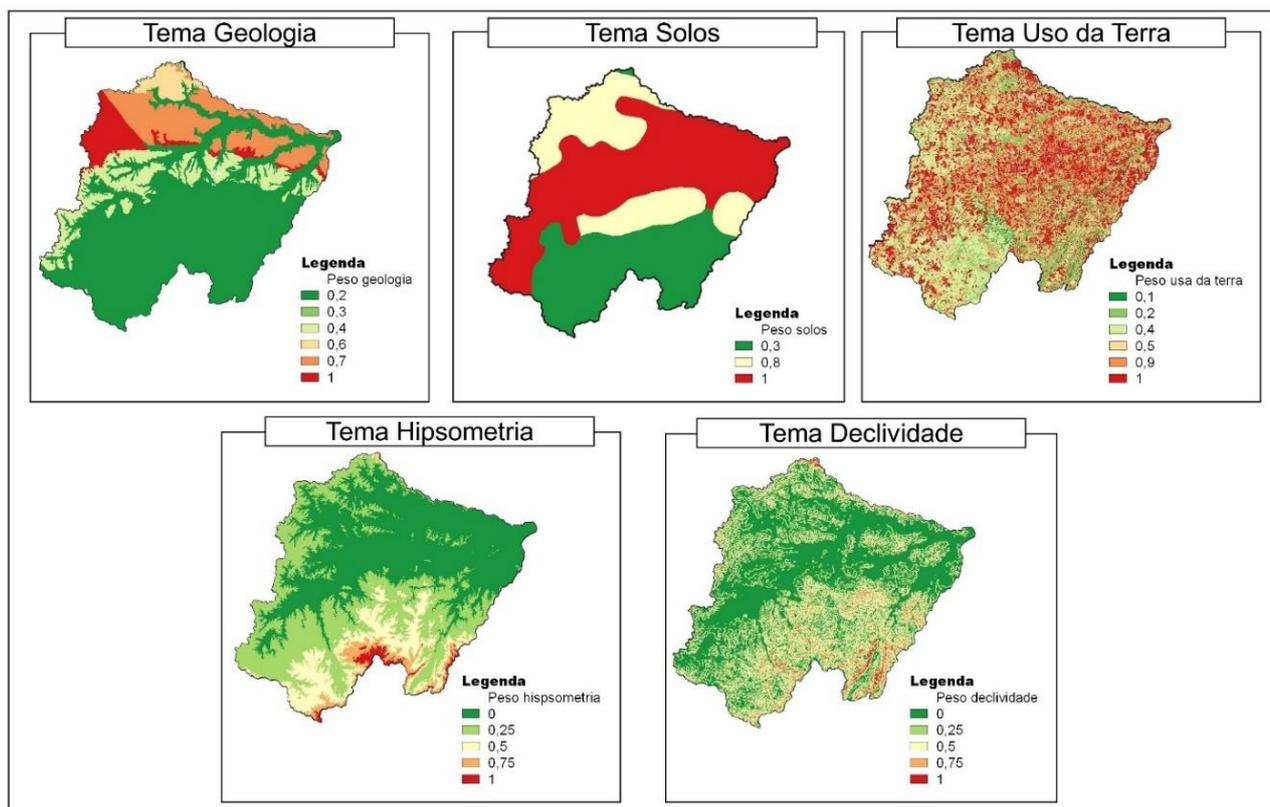


Figura 2. Esquema mostrando os temas utilizados na definição do mapa de fragilidade ambiental da BHRV. Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Através dos resultados encontrados, observa-se na Figura 3 a disposição da fragilidade ambiental obtida para a BHRV. Destaca-se a concentração de áreas com baixa fragilidade na porção sul e áreas com alta e muito alta fragilidade na porção central e norte da bacia.

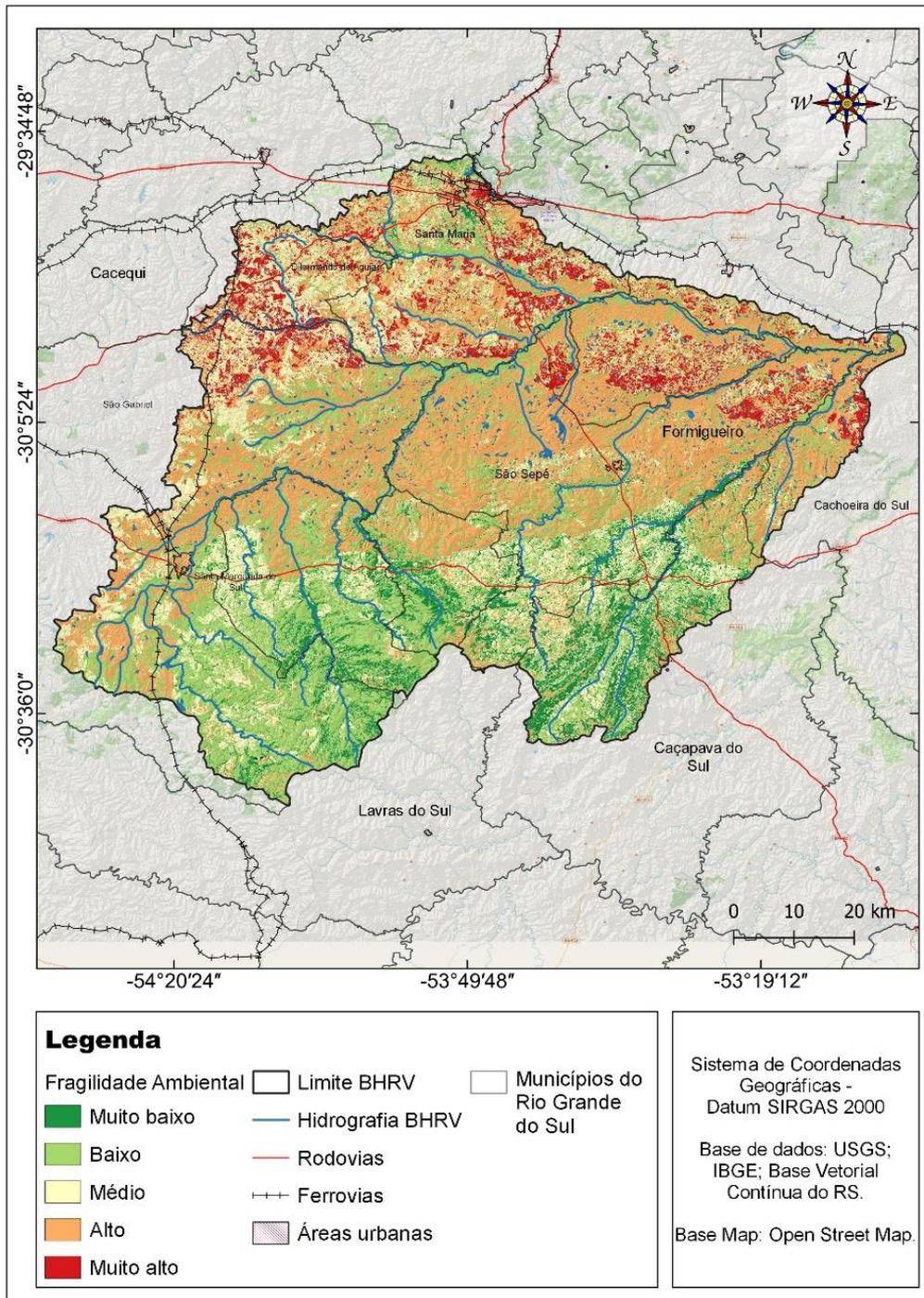


Figura 3. Mapa de Fragilidade Ambiental da BHRV. Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A baixa fragilidade na porção sul é decorrente das características geomorfológicas do Escudo Rio-Grandense, que possui grandes áreas escarpadas (altitudes e declividades elevadas) de rochas cristalinas, baixa fertilidade dos solos e baixa densidade de ocupação e ação antrópica (SOARES; SASSI, 2019). Essas características implicam em reduzida alteração no equilíbrio dinâmico nessa porção da BHRV, com a manutenção de importante parcela de vegetação nativa, principalmente de característica arbórea arbustiva, como observado na Figura 4.



Figura 4. Área de transição entre a depressão central do RS e o Escudo Cristalino. Fonte: Fotografado pelos autores (2024).

Nessa porção da BHRV (representada na Figura 4), as áreas escarpadas, dificultam ações antrópicas mais incisivas, o que garante menor alteração no equilíbrio dinâmico e conseqüentemente menor fragilidade ambiental é diagnosticada. Uma condição semelhante foi identificada por Arrial (2023), ao estudar o Arroio Ferreira, porção norte do município de Santa Maria (RS), o autor observou que as espécies da mata Atlântica se encontram mais preservadas nas encostas declivosas do Rebordo do Planalto. Em contraponto Beilfuss, Petsch e Trentin (2024) observaram que no município de Jari, o cultivo da soja está avançando sobre áreas de maior inclinação, havendo tendência de ampliação das áreas cultivadas até o ano de 2030.

Já as porções central e norte, são compostas por relevo de colinas com substrato de rochas sedimentares da depressão central do RS, amplamente utilizadas para a agricultura e pecuária (Figura 5). Estas áreas são vinculadas a uma estrutura fundiária de grandes propriedades, onde o principal produto cultivado é a soja. Nessa porção da bacia, é comum o uso excessivo de insumos agrícolas, já que são necessários para garantir a produtividade das lavouras. Tais formas de manejo podem impulsionar a aceleração de processos erosivos, a degradação dos solos e gerar pressão sobre as matas ciliares.

O uso excessivo de insumos agrícolas pode comprometer a qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Com relação contaminação das águas subterrâneas, Kemerich et al., (2013) ao estudar a Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-mirim diagnosticaram que as condições da bacia hidrográfica condicionavam diferentes níveis de comprometimento das águas subterrâneas, em condição da vulnerabilidade estar associada a áreas de recarga localizadas junto as sequências de rochas sedimentares da bacia do Paraná.



Figura 5. Colinas da depressão periférica ocupadas com agricultura. Fonte: Fotografado pelos autores (2024).

Destaca-se que na área representada pela Figura 5, no inverno são cultivados azevém e aveia, e no período de primavera e verão é cultivada soja. Já na porção central da BHRV, às margens do rio principal e afluentes mais volumosos, ocorre a utilização das planícies de inundação com finalidade de cultivo de arroz. Nestas áreas da

porção central, a água do rio é utilizada para irrigação e pecuária, e a localização das lavouras, próximas ao curso d'água, potencializa o risco de contaminação (MARCHESAN et al., 2010).

Por se tratar de uma bacia hidrográfica que drena grandes áreas agricultáveis, as áreas de fragilidade muito alta e alta, estão associadas as alterações antrópicas, que são associadas e ponderadas a outros fatores ambientais, como declividade, tipos de rocha e solo. Com relação ao quantitativo de área classificada, conforme a presente proposta de mapeamento, destaca-se o predomínio de áreas com fragilidade alta, conforme pode-se observar na Tabela 5.

Tabela 5. Quantitativo das classes de fragilidade ambiental, definidas para a BHRV. Fonte: Organizado pelos autores (2024).

Classes	Área (Km ²)	Área (%)
Muito baixa	815,96	8,38
Baixa	2872,41	29,52
Média	1969,78	20,24
Alta	3471,09	35,67
Muito Alta	602,00	6,19

Em relação a utilização da AHP na definição da vulnerabilidade ambiental, Pinese Júnior e Rodrigues (2012), ao determinarem a vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Piedade (MG) concluíram que a ferramenta mostrou-se imparcial e minimizou os erros de julgamento. Essa afirmação corrobora com a metodologia adotada no presente trabalho, que se baseou no conhecimento das características da área e na compreensão dos seus processos.

Algumas alternativas podem ser aplicadas para diminuir os impactos, em especial nas áreas classificadas através da AHP, como de fragilidade ambiental alta e muita alta. A redução destes impactos se relaciona a ações de planejamento que visem a compreensão dos processos em nível de bacia hidrográfica, respeito à legislação ambiental e às áreas de proteção permanente (APP), bem como práticas agrícolas que atentem aos problemas relacionados à erosão acelerada dos solos.

5. Conclusões

As considerações dos estudos ambientais e do uso dos procedimentos metodológicos de ponderação, permitem conhecer e analisar de maneira minuciosa as condições do ambiente. E logo, permite o planejamento de maneira racional do uso dos recursos naturais em busca de um desenvolvimento sustentável.

A escolha da AHP, como procedimento para a obtenção da fragilidade ambiental, se mostrou eficiente, porém demanda de um conhecimento prévio dos componentes ambientais da área de estudo com finalidade de anular erros relacionados a parcialidade. A atribuição de pesos por classe, é baseada em trabalhos pré-existentes e na experiência dos pesquisadores. O mapeamento realizado poderá orientar ações antrópicas sobre o meio físico e biológico, como a definição de áreas prioritárias para reflorestamento, o controle de práticas agrícolas intensivas e a delimitação de zonas de proteção ambiental, bem como o avanço de empreendimentos industriais.

Os resultados desse trabalho, em especial as áreas indicadas com fragilidades mais acentuadas, não visam criticar e/ou propor ações que limitem determinados tipos de uso na BHRV, mas sim trabalhar em prol de uma forma de produção que minimize problemas ambientais futuros, os quais afetam as populações e o desenvolvimento econômico.

Contribuições dos Autores: João Vicitor Bergamo de Siqueira - Organização da base cartográfica, construção do texto, elaboração de mapas e tabelas; George Gabriel Schnorr - Construção do texto, elaboração de mapas e tabelas; Anderson Augusto Volpato Scoti - Construção do texto e revisão de conteúdo.

Financiamento: Fundo de Incentivo à Pesquisa – FIPE/UFMS

Agradecimentos: Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Maria pelo fomento à pesquisa e apoio institucional.

Referências

1. **ARRIAL, G. S. Análise dos impactos ambientais na bacia hidrográfica do Arroio Ferreira, município de Santa Maria, RS.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2023. 56p.
2. **BEILFUSS, E. M.; PETSCH, C.; TRENTIN, R.** Dinâmica do uso e cobertura da terra em Jari (RS) e cenários de expansão da soja entre 2025-2030. **RA'EGA**, v. 60, n. 12, p. 209–229, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v60i0.95302>
3. **CALDAS, V. I. S. P.; SILVA, A. S.; SANTOS, J. P. C.** Suscetibilidade à erosão dos solos da bacia hidrográfica lagos–São João, no Estado do Rio de Janeiro–Brasil, a partir do método AHP e análise multicritério. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 12, n. 04, p. 1415-1430, 2019. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.4.p1415-1430>
4. **COLARES, I. S. et al.** Suscetibilidade do solo à erosão na bacia hidrográfica do Rio Tarumã-Açu (Amazonas–Brasil). **Caminhos de Geografia**, v. 23, n. 89, p. 367-389, 2022. DOI: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/60655>
5. **DA SILVA ANJINHO, P. et al.** Environmental fragility analysis in reservoir drainage basin land use planning: A Brazilian basin case study. **Land Use Policy**, v. 100, p. 104946, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104946>
6. **DA SILVEIRA, C. T. et al.** Classificação automatizada de elementos de relevo no estado do Paraná (Brasil) por meio da aplicação da proposta dos geomorphons. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília v. 19, n. 1, p. 33-57, 2018. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i1.1263>
7. **DOTTO, A. V.E.; GABERTI, M. M.; ROBAINA, L. E. S.** Aplicação do Processo Hierárquico Analítico (AHP) para o Mapeamento de Suscetibilidade ao Voçorocamento no município de Capão do Cipó–RS/Brasil. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie**, n. 60, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4000/confins.53318>
8. **FONSECA, E. H.; CIROLINI, A.; BRUCH, A. F.** Método de análise hierárquica de processos (AHP) aplicado a fragilidade ambiental da sub-bacia hidrográfica Rolante, Brasil. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 17, n. 1, p. 1-18, 2023. DOI: <https://doi.org/10.18316/rca.v17i1.8084>
9. **GODOY, Michel Marques et al (orgs.). Geologia e Recursos Minerais da folha Santa Maria SH.22-V-C-IV:** estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CPRM, 2018. 1 mapa, color. Escala 1:100.000. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20464?mode=full>, acesso em 10 de agosto de 2023.
10. **GOUVEIA, I. C. M; ROSS, J. L. S.** Fragilidade Ambiental: uma Proposta de Aplicação de Geomorphons para a Variável Relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v.39, p.123-136, 2019. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v37i0.151030>
11. **GUERRA, A. J. T. JORGE, M. do C. O. Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas.** São Paulo: Bertrand, 2013.
12. **HASENACK, H.; WEBER, E.(org.)** Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul – escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3). ISBN 978-85-63483-00-5 (livreto) e ISBN 978-85-63843-01-2 (DVD).
13. **KEMERICH, P. D. C. et al.** Vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim: uso da metodologia GOD. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 10, n. 2, 2013. Disponível em: <http://ferramentas.unipinhal.edu.br/engenhariaambiental/viewarticle.php?id=873&layout=abstract&locale=>. Acesso em: 21 nov. 2024.
14. **LIRA, K. C. S; FRANCISCO, H. R.; FEIDEN, A.** Classificação de fragilidade ambiental em bacia hidrográfica usando lógica Fuzzy e método AHP. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 34, p. 1-17, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-62872>
15. **MARCHESAN, Enio et al.** Resíduos de agrotóxicos na água de rios da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 5, p. 1053-1059, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000078>
16. **PINESE JÚNIOR, J. F.; RODRIGUES, S. C.** O método de análise hierárquica–AHP–como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Piedade (MG). **Revista do Departamento de Geografia**, v. 23, p. 4-26, 2012. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0023.0001>

17. ROBAINA, Luís Eduardo de Souza et al. Application of the concept of geomorphons to the landform classification in Tocantins state, Brazil. **RA'EGA**, v. 41, p. 37-48, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5380/raega.v41i0.48724>
18. ROBAINA, L. E. S. et al. Utilização da Análise Hierárquica Ponderada em Atributos do Relevo para o Zoneamento de Suscetibilidade a Voçorocamentos na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria/RS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 15, n. 02, p. 994-1008, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.2.p994-1008>
19. ROSA, R. Geotecnologias na geografia aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 16, p. 81-90, 2005. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2005.0016.0009>
20. ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 8, p. 63-74, 1994. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>
21. SAATY, Thomas. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill, 1980.
22. SAATY, T. L. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. **Management Science**, v. 32, n. 7, p. 841-855, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1287/mnsc.32.7.841>
23. SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica**. Tradução e Revisão por Wainer da Silveira e Silva. São Paulo: McGraw-Hill Publisher, 1991.
24. SAATY, T. L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. **The Institute for Operations Research and the Management Sciences**. V. 24, n. 6, p. 19-43, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1287/inte.24.6.19>
25. SILVA, Agostinho Alves de Lima. Impactos de mudanças do uso da terra sobre a saúde humana. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v.73, n. 1, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602021000100005>
26. SCHNORR, G. G.; SCCOTI, A. A. V.; PETSCH, C. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Vacacaí: Centro do Rio Grande do Sul. **Revista Geonorte**, v. 12, n. 39, p. 44-63, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21170/geonorte.2021.V.12.N.39.44.63>
27. SILVA, C. D; NUNES, F. D. P. Mapeamento de vulnerabilidade ambiental utilizando o método AHP: uma análise integrada para suporte à decisão no município de Pacoti/CE. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** INPE, 2009. p. 5435-5442.
28. SILVA, D. M. R. **Aplicação do método AHP para avaliação de projetos industriais**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007. 307p.
29. SOARES JÚNIOR, C. J. R. Utilização da técnica AHP nos índices de vulnerabilidade natural a erosão na bacia hidrográfica do Igarapé São Francisco como suporte para o ordenamento territorial. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 5, p. 694-704, 2020. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.005.0061>
30. SOARES, P. R. R.; SASSI, L. O. A RIDE metade sul do Rio Grande do Sul e as escalas do planejamento regional. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, n. 34, p.124-134, 2019. Disponível em: <http://200.198.145.164/index.php/boletim-geografico-rs/article/view/4373/4087>. Acesso em: 10 de agosto de 2023.
31. TEIXEIRA, T. M. A.; OLIVEIRA, V. P. V.; TEIXEIRA, C. O. Fragilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio São João de Tiba, extremos sul da Bahia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.14, n.04, p.1941-1956, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p1941-1956>
32. WILDNER, W.; RAMGRAG, G. E.; LOPES R. C.; IGLESIAS, C. F. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. 1:750000. CPRM, Serviço Geológico do Brasil. Porto Alegre, RS. 2008.