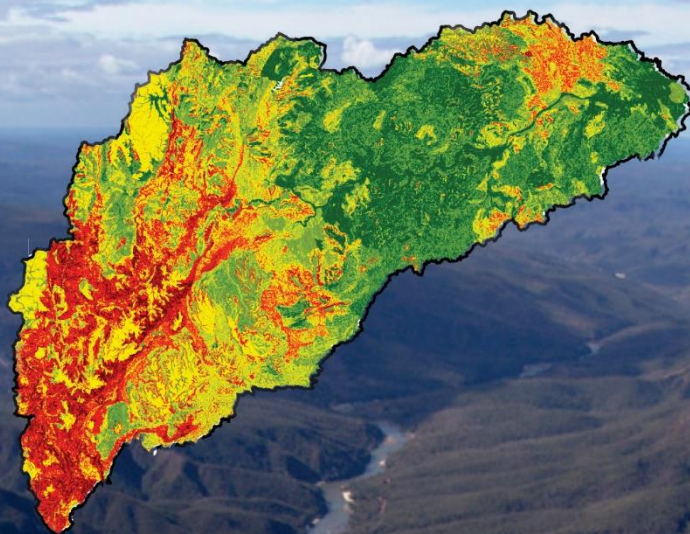


Luciano C. de Jesus França  
Danielle Piuzana Mucida



# A fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha em Minas Gerais



Pantanal Editora

2022

**Luciano Cavalcante de Jesus França  
Danielle Piuzana Mucida**

**A fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha em Minas Gerais**



Pantanal Editora

2022

Copyright© Pantanal Editora

**Editor Chefe:** Prof. Dr. Alan Mario Zuffo

**Editores Executivos:** Prof. Dr. Jorge González Aguilera e Prof. Dr. Bruno Rodrigues de Oliveira

**Diagramação:** A editora. **Diagramação e Arte:** A editora. **Imagens de capa e contracapa:** Canva.com. **Revisão:** O(s) autor(es), organizador(es) e a editora.

### Conselho Editorial

#### Grau acadêmico e Nome

Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos  
Profa. Msc. Adriana Flávia Neu  
Profa. Dra. Allys Ferrer Dubois  
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior  
Profa. Msc. Aris Verdecia Peña  
Profa. Arisleidis Chapman Verdecia  
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva  
Prof. Dr. Bruno Gomes de Araújo  
Prof. Dr. Caio Cesar Enside de Abreu  
Prof. Dr. Carlos Nick  
Prof. Dr. Claudio Silveira Maia  
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos  
Prof. Dr. Cristiano Pereira da Silva  
Profa. Ma. Dayse Rodrigues dos Santos  
Prof. Msc. David Chacon Alvarez  
Prof. Dr. Denis Silva Nogueira  
Profa. Dra. Denise Silva Nogueira  
Profa. Dra. Dennyura Oliveira Galvão  
Prof. Dr. Elias Rocha Gonçalves  
Prof. Me. Ernane Rosa Martins  
Prof. Dr. Fábio Steiner  
Prof. Dr. Fabiano dos Santos Souza  
Prof. Dr. Gabriel Andres Tafur Gomez  
Prof. Dr. Hebert Hernán Soto Gonzáles  
Prof. Dr. Hudson do Vale de Oliveira  
Prof. Msc. Javier Revilla Armesto  
Prof. Msc. João Camilo Sevilla  
Prof. Dr. José Luis Soto Gonzales  
Prof. Dr. Julio Cezar Uzinski  
Prof. Msc. Lucas R. Oliveira  
Profa. Dra. Keyla Christina Almeida Portela  
Prof. Dr. Leandro Argentel-Martínez  
Profa. Msc. Lidiene Jaqueline de Souza Costa Marchesan  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann  
Prof. Msc. Marcos Pisarski Júnior  
Prof. Dr. Marcos Pereira dos Santos  
Prof. Dr. Mario Rodrigo Esparza Mantilla  
Profa. Msc. Mary Jose Almeida Pereira  
Profa. Msc. Núbia Flávia Oliveira Mendes  
Profa. Msc. Nila Luciana Vilhena Madureira  
Profa. Dra. Patrícia Maurer  
Profa. Msc. Queila Pahim da Silva  
Prof. Dr. Rafael Chapman Auty  
Prof. Dr. Rafael Felipe Ratke  
Prof. Dr. Raphael Reis da Silva  
Prof. Dr. Renato Jaqueto Goes  
Prof. Dr. Ricardo Alves de Araújo (*In Memoriam*)  
Profa. Dra. Sylvana Karla da Silva de Lemos Santos  
Msc. Tayronne de Almeida Rodrigues  
Prof. Dr. Wéverson Lima Fonseca  
Prof. Msc. Wesclen Vilar Nogueira  
Profa. Dra. Yilan Fung Boix  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

#### Instituição

OAB/PB  
Mun. Faxinal Soturno e Tupanciretã  
UO (Cuba)  
IF SUDESTE MG  
Facultad de Medicina (Cuba)  
ISCM (Cuba)  
UFESSPA  
UEA  
UNEMAT  
UFV  
AJES  
UFGD  
UEMS  
IFPA  
UNICENTRO  
IFMT  
UFMG  
URCA  
ISEPAM-FAETEC  
IFG  
UEMS  
UFF  
(Colômbia)  
UNAM (Peru)  
IFRR  
UCG (México)  
Mun. Rio de Janeiro  
UNMSM (Peru)  
UFMT  
Mun. de Chap. do Sul  
IFPR  
Tec-NM (México)  
Consultório em Santa Maria  
UFJF  
UEG  
FAQ  
UNAM (Peru)  
SEDUC/PA  
IFB  
IFPA  
UNIPAMPA  
IFB  
UO (Cuba)  
UFMS  
UFPI  
UFG  
UEMA  
IFB  
  
UFPI  
FURG  
UO (Cuba)  
UFT

Conselho Técnico Científico  
- Esp. Joacir Mário Zuffo Júnior  
- Esp. Maurício Amormino Júnior  
- Lda. Rosalina Eufrausino Lustosa Zuffo

Ficha Catalográfica

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

F814f França, Luciano Cavalcante de Jesus.  
A fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha em Minas Gerais [livro eletrônico] / Luciano Cavalcante de Jesus França, Danielle Piuzana Mucida. – Nova Xavantina, MT: Pantanal, 2022. 52p.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN 978-65-81460-24-2

DOI <https://doi.org/10.46420/9786581460242>

1. Meio ambiente. 2. Bacias hidrográficas – Manejo. 3. Ecossistemas. I. Mucida, Danielle Piuzana. II. Título.

CDD 363.7

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**



Nossos e-books são de acesso público e gratuito e seu download e compartilhamento são permitidos, mas solicitamos que sejam dados os devidos créditos à Pantanal Editora e também aos organizadores e autores. Entretanto, não é permitida a utilização dos e-books para fins comerciais, exceto com autorização expressa dos autores com a concordância da Pantanal Editora.

**Pantanal Editora**

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000.  
Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil.  
Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp).  
<https://www.editorapantanal.com.br>  
[contato@editorapantanal.com.br](mailto:contato@editorapantanal.com.br)

## Resumo

A degradação dos ecossistemas naturais tem desencadeado problemas de ordem ambiental, econômica e social a nível global, sendo um dos maiores desafios a ser enfrentado neste século. Embora ambiciosas metas nacionais e globais tenham sido definidas, áreas prioritárias sob múltiplas perspectivas ambientais e espaciais ainda precisam ser identificadas. Neste estudo aplicamos uma abordagem metodológica multicritério no mapeamento da fragilidade ambiental para a bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha, no sudeste do Brasil. Combinamos duas importantes abordagens científicas para esse mapeamento. O modelo matemático *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e a Combinação Linear Ponderada (CLP) foram integrados em um Sistema de Informações Geográficas (GIS), sob perspectivas da Análise de Decisão Multicritério (AMC). Utilizamos das concepções da fragilidade ambiental potencial e emergente, que se estabelecem como classes a partir de um conjunto de indicadores biogeofísicos da paisagem. Para obtenção da fragilidade ambiental foram utilizados planos de informações de declividade do terreno, pedologia, domínios geológicos, hierarquia de drenagens, pluviosidade, cobertura e uso da terra para o mapeamento.

Nossos resultados indicam que a classe de fragilidade ambiental potencial com maior predominância foi a “média” fragilidade, com extensão equivalente a 30% da área total da bacia hidrográfica avaliada. Já a fragilidade ambiental emergente apontou 53,78% da bacia também predominância da fragilidade “média”. Uma Razão de Consistência (RC) foi calculada a partir dos pesos do AHP para os planos de informação, resultando em 0,07, valor dentro dos limites de confiabilidade aceitáveis pela metodologia AHP.

Nossos resultados chamam atenção para as taxas de fragilidade ambiental desta região do Brasil, que apresenta um mosaico de ecossistema com espécies vegetais endêmicas e algumas ameaçadas de extinção, em zona considerada *hotspot* mundial para a conservação da biodiversidade, em especial o Alto Jequitinhonha. A metodologia aplicada nesse estudo pode ser experimentada em outras ecorregiões do Brasil e do mundo. Estes resultados proporcionam pressupostos importantes para nortear ordenamento territorial e ambiental a baixo custo, flexível replicação e pode ser adotado por gestores públicos e privados. Outros parâmetros podem ser testados e ajustados de acordo com as características morfodinâmicas de cada região e padrões da paisagem.

## Apresentação

Pensar a conservação de bacias hidrográficas, seus recursos naturais e sua biodiversidade, tornou-se uma questão prioritária na agenda de discussões em planejamento ambiental e políticas públicas socioambientais. Um dos locais mais emblemáticos do Brasil Colônia/Império é o estado de Minas Gerais, dada a importância econômica do estado vinculada sobretudo ao erário mineral (ouro, diamante, ferro, dentre outros), assim como sua inestimável relevância ecológica e hidrográfica. Dentre as maiores bacias hidrográficas de Minas Gerais, destaca-se a do Rio Jequitinhonha. É tamanha a importância do contexto histórico da bacia do Rio Jequitinhonha, englobando seus recursos naturais e culturais, que parte dessa região engloba a área declarada pela Unesco, em 2005, como Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço (RBSE). Além disso, a bacia do Rio Jequitinhonha foi declarada como monumento natural através da Constituição Estadual em 1989. O rio nasce no município do Serro a uma altitude aproximada de 1.300m e em seu vale abriga uma população rica em expressões culturais e em toda sua área uma incalculável riqueza ecológica em fauna, flora e hídrica. Parte dos municípios da bacia foram ocupados pelos europeus ainda no século XVIII devido aos diamantes e ouro existentes no local.

Há alguns anos fomos surpreendidos por evidências e questionamentos sobre a fragilidade ambiental da bacia do Rio Jequitinhonha, transversalmente à debates sobre a conservação da biodiversidade local, dos contornos de organização da vegetação nativa local e o contexto cultural das formas de uso e ocupação das terras na região. Buscamos reconhecer parte da região e seus territórios por imagens de satélites, mas percebemos a necessidade de uma investigação mais profunda das condições de fragilidade à degradação ambiental da bacia. Do ponto de vista metodológico, constatamos que uma análise espacial com múltiplos fatores ou variáveis ambientais poderia nos oferecer parte das respostas às nossas hipóteses. Ao tempo que realizamos um mapeamento da fragilidade ambiental da bacia do Rio Jequitinhonha, tivemos a experiência de percorrer em campo e reconhecer os padrões observados pela modelagem geoespacial da fragilidade ambiental.

Este livro digital representa o primeiro trabalho de identificação de áreas prioritárias para a conservação e/ou restauração a partir da elaboração do mapeamento de fragilidade ambiental potencial e emergente para toda a bacia do Rio Jequitinhonha na porção do estado de Minas Gerais. O estudo foi desenvolvido entre os anos de 2016 e 2018 junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da UFVJM. Muitas perguntas são respondidas ao longo deste estudo, mas novas perguntas são estabelecidas para outras lacunas no conhecimento da bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha, como estímulo e contribuição às futuras outras pesquisas.

Neste estudo, hipotetizamos que a análise de decisão multicritério (AMC) implementada em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) e pautada na abordagem matemática AHP, ao integrarem os elementos físicos-naturais da paisagem poderiam definir as relações de fragilidade ambiental potencial e emergente da bacia do Rio Jequitinhonha. Há uma carência de informações técnicas e científicas relacionadas ao mapeamento de sítios frágeis que direcionem o entendimento da

vulnerabilidade dos ecossistemas sob a perspectiva da conservação, restauração, combate ao desmatamento e outros problemas ambientais no Brasil. Nosso trabalho provê resultados e recomendações para a conservação e restauração na escala de uma grande bacia hidrográfica.

Dentre as principais contribuições deste estudo estão a proposição de indicadores/parâmetros da paisagem para integração de modelo de fragilidade ambiental e a integração de importantes abordagens metodológicas objetivando determinar o estado de fragilidade da referida bacia hidrográfica. Para isso, examinamos o tema a partir de uma adaptação metodológica de Ross (1994), a fim de determinar com eficiência os diferentes níveis de fragilidade ambiental à processos de degradação ambiental.

Esperamos com este livro oferecer fundamentos e informações para ajudar no fortalecimento do conjunto da obra da literatura de base sobre esta região e esperamos com este material prestar-se como referência bibliográfica para estudantes e profissionais das diversas áreas das ciências ambientais, florestais, agrárias e correlatas, interessados em manejo de ecossistemas a nível de bacias hidrográficas.

Os autores

## Sumário

|  |    |
|--|----|
| <b>Resumo</b> .....  | 4  |
| <b>Apresentação</b> .....  | 5  |
| <b>Visão Geral</b> .....   | 8  |
| <b>Estudo de caso: a Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha</b> ..... | 11 |
| Planos de informação geográfica e processamentos.....                  | 13 |
| Determinação dos pesos por AHP e verificação de consistência .....     | 15 |
| Análise Multicritério (AMC) .....                                      | 16 |
| <b>Resultados</b> .....  | 23 |
| Analytical Hierarchy Process (AHP).....                                | 23 |
| Fragilidade Ambiental Potencial (FAP) e Emergente (FAE) .....          | 24 |
| <b>Discussão</b> .....   | 27 |
| Análise do modelo AHP.....   | 27 |
| Implicações práticas da FAP e FAE .....                                | 28 |
| Avaliação do método: avanços e desafios .....                          | 32 |
| Recomendações para a gestão ambiental.....                             | 34 |
| <b>Conclusões e Perspectivas</b> .....                                 | 37 |
| <b>Agradecimentos</b> .....  | 38 |
| <b>Referências Bibliográficas</b> .....                                | 39 |
| <b>Sobre os autores</b> .....  | 50 |
| <b>Índice Remissivo</b> .....  | 52 |



## Visão Geral

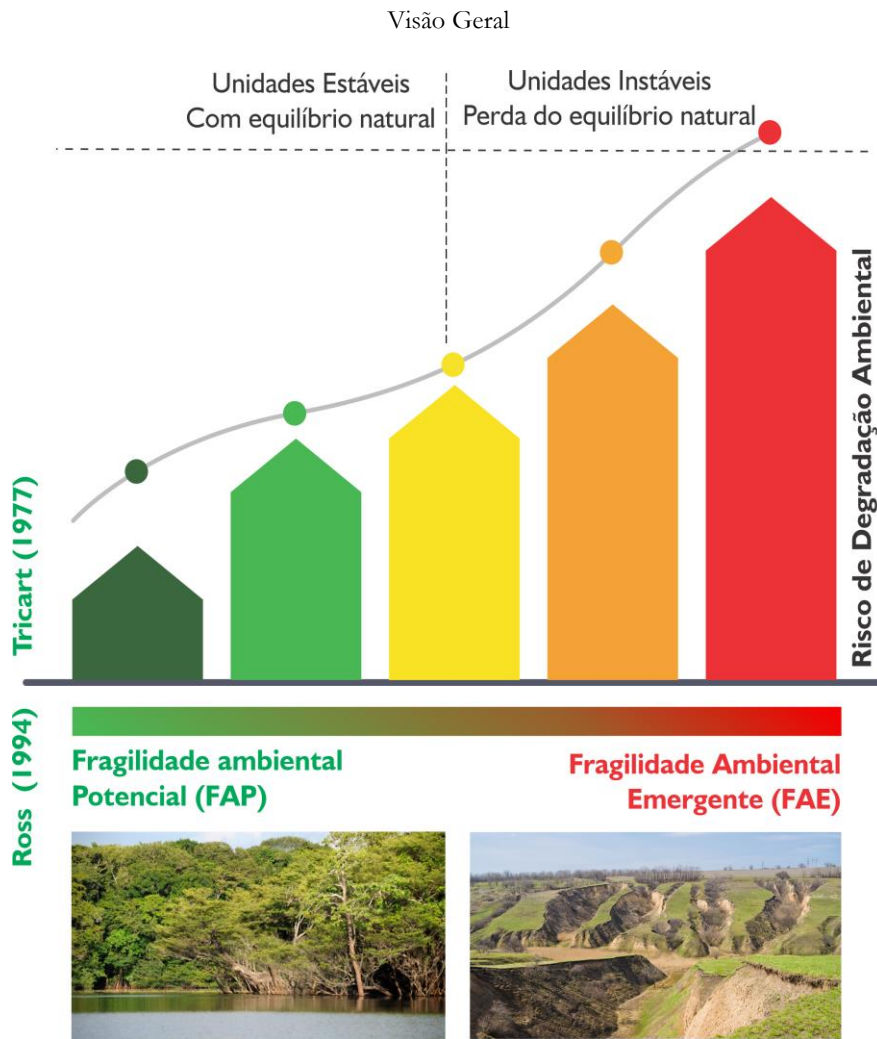
---

A degradação do solo é um problema ambiental que afeta o bem-estar de 1,5 bilhão de pessoas em todo o mundo (Li et al., 2021; Albaladejo et al., 2021). Este processo está relacionado à perda de longo prazo dos serviços e funções do ecossistema que beneficiam a sociedade e o desenvolvimento econômico, sendo um dos maiores desafios globais da atualidade (Nkonya et al., 2016; Mekuria et al., 2018; Chappell et al., 2019). Estudos indicam que mais da metade das terras agrícolas do mundo apresenta estágios de degradação (UNCCD, 2014; Tesfahunengn, 2019).

Os ecossistemas naturais, quando sujeitos a uma ampla gama de distúrbios naturais ou antrópicos, representam uma ameaça real à saúde das florestas e aos vários benefícios que fornecem à sociedade e ao funcionamento do sistema global (Právālie, 2018; Baude et al., 2019). Os cenários apontam para o declínio da biodiversidade para este século e possibilitam auxiliar na avaliação dos impactos decorrentes do desenvolvimento socioeconômico sobre os serviços ecossistêmicos (Pereira et al., 2010; Segan et al., 2016). Restaurar 30% dos ecossistemas degradados no mundo pode evitar o desaparecimento de 71% das espécies vegetais que serão extintas nas próximas décadas. Além disso, se restaurados, esses ecossistemas podem remover aproximadamente 466 bilhões de toneladas de dióxido de carbono do planeta, o que equivale a 49% do total acumulado desde a Revolução Industrial (Strassburg et al., 2020).

Investigações científicas relacionadas à avaliação da degradação do solo são fundamentais para o desenvolvimento de planos de mitigação locais a globais com foco na minimização dos impactos adversos associados. Apesar disso, embora muitos estudos sejam realizados sobre a degradação de ecossistemas, poucos se dedicam a compreender a fragilidade ambiental das paisagens naturais e antropizadas.

O conceito de fragilidade ambiental originou-se das concepções das Unidades Ecodinâmicas do meio ambiente, estabelecidas por Tricart (1977), Figura 1. O tema foi refinado e utilizado no Brasil com base no índice de fragilidade ambiental proposto por Ross (1994). O índice está ligado à susceptibilidade dos ambientes à erosão e sedimentação do solo e rupturas no equilíbrio dinâmico e, conseqüentemente, à degradação de ecossistemas. Nesse sentido, esses ecossistemas naturais estão em equilíbrio dinâmico no que diz respeito às trocas de energia e matéria e podem ser alterados por intervenções humanas, gerando desequilíbrios temporários ou permanentes (Anjinho et al., 2021). Ross (1994) desenvolveu as abordagens de Fragilidade Ambiental Potencial (FAP) e Fragilidade Ambiental Emergente (FAE). A FAP permite avaliar o equilíbrio dinâmico natural do geossistema e considera apenas os elementos ou atributos naturais da paisagem e o FAE, por outro lado, resulta da aplicação do potencial de fragilidade e uso do solo; reflete diretamente a ação antrópica sobre o ecossistema (Figura 1).



**Figura 1.** Ilustração do conceito de fragilidade ambiental potencial e emergente (Ross, 1994) quanto às Unidades Ecodinâmicas da paisagem (Tricart, 1977) e implicações na degradação ambiental (Fonte: os autores, 2020).

A associação da abordagem multicritério para mapeamentos de fragilidade ambiental pode ser modelado com maior precisão a partir do auxílio do modelo AHP (*Analytic Hierarchy Process*), um método proposto por Saaty (1980) que consiste em um modelo matemático que permite a incorporação da atribuição de pesos à dados espaciais e obtenção de melhores alternativas para resolução de problemas de múltiplos fatores, garantindo maior consistência nas análises realizadas (França et al., 2020). A abordagem AHP permite a participação de diferentes *stakeholders* (Giamalaki; Tsoutsos, 2019) por meio de comparações ponderadas e pareadas entre fatores de avaliação para ordenamento das alternativas de escolhas, para a determinação da importância dessas alternativas.

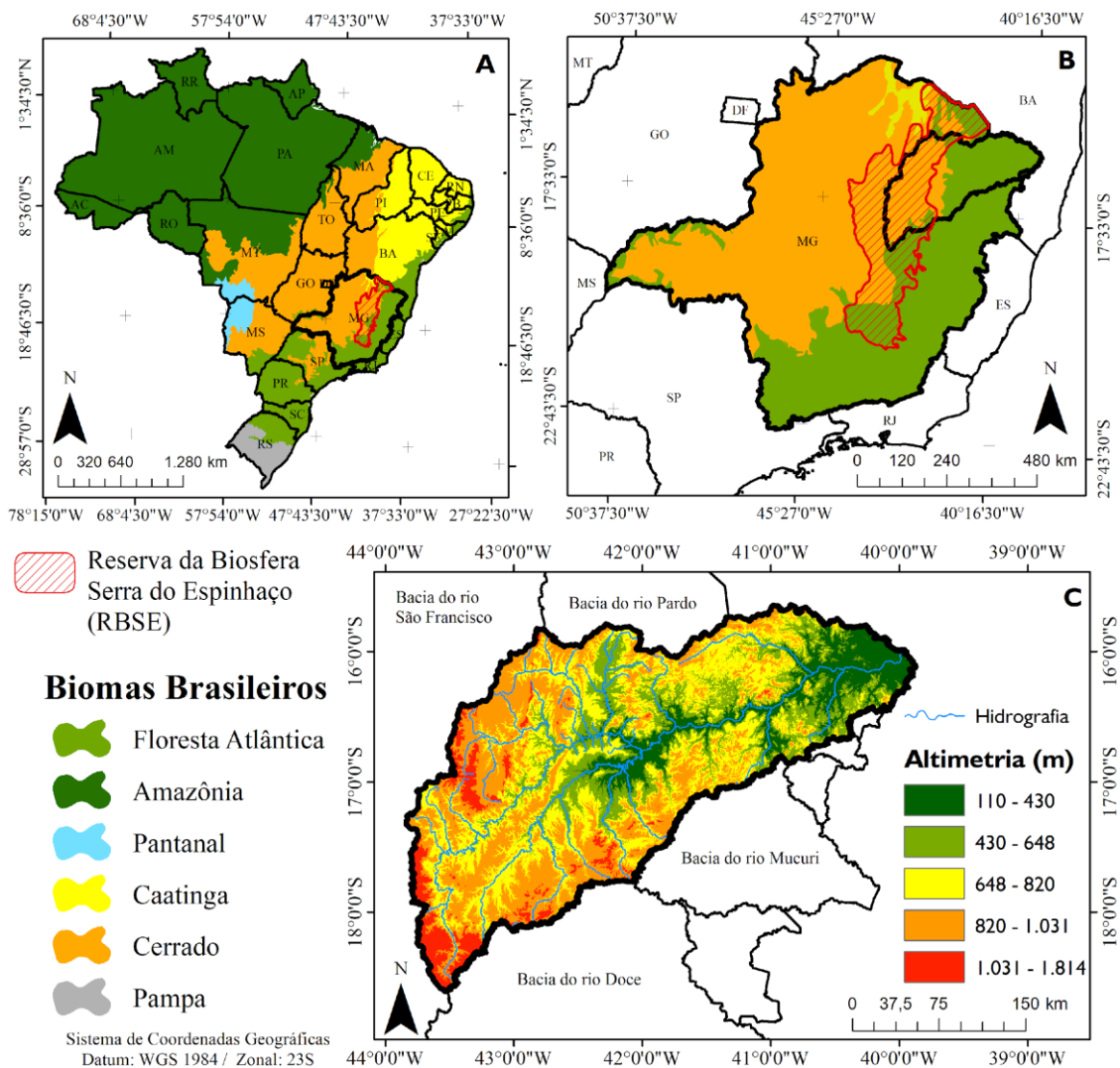
Neste sentido, o mapeamento de fragilidade ambiental por meio dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) associado ao modelo de pesquisa operacional AHP, compõem ferramentas poderosas de planejamento e gestão ambiental. A geração de produtos sobre fragilidade ambiental é um importante avanço em apoio a decisão a formuladores de políticas públicas (Manfré et al., 2013; Anjinho et al., 2021), e a integração do GIS e AHP podem compor importantes modelos de inteligência territorial para tomadas de decisões complexas para o meio ambiente.

Neste estudo, hipotetizamos que a análise de decisão multicritério (AMC) em GIS e abordagem AHP ao integrarem os elementos físicos-naturais da paisagem definem as relações de fragilidade ambiental potencial e emergente de uma bacia hidrográfica. Há uma carência de informações técnicas e científicas relacionadas ao mapeamento de sítios frágeis que direcionem o entendimento da vulnerabilidade dos ecossistemas sob a perspectiva da conservação, restauração, combate ao desmatamento e outros problemas ambientais no Brasil. O país nos últimos anos tem sentido o impacto do desmatamento ilegal (Trigueiro et al., 2020; West; Fearnside, 2021) e dos incêndios florestais (Mota et al., 2019). Além disso, há um campo de pesquisa carente de contribuições que auxiliem no planejamento ambiental em ações para o Brasil conseguir cumprir as metas assumidas na Conferência das Partes (COP-21, 2015; COP-21, 2019) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Mudanças do Clima (UNFCCC). O país se comprometeu a reflorestar 12 milhões de hectares até 2030 (BRASIL, 2017), além de outras boas práticas ambientais.

Logo, dentre as principais contribuições deste estudo estão a proposição de indicadores/parâmetros da paisagem para integração de modelo de fragilidade ambiental e a integração de importantes abordagens metodológicas objetivando determinar o estado de fragilidade de uma bacia hidrográfica. Para isso, examinamos o tema a partir de uma adaptação metodológica de Ross (1994), a fim de determinar com eficiência os diferentes níveis de fragilidade ambiental à processos de degradação ambiental, sob o objetivo principal de aplicar uma metodologia para mapeamento da fragilidade ambiental potencial e emergente da bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha, no sudeste do Brasil.

# Estudo de caso: a Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha

Analisamos a área correspondente à bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha (BHRJ) aqui em diante), no estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil, com uma área de 66.319 km<sup>2</sup>. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, varia em Cwb e Cwa, com inverno seco e verão temperado e verão quente respectivamente; e clima tropical (As) com verão seco (Alvarez et al., 2013). A BHRJ apresenta características climáticas que variam do semiárido à úmido, com média dos totais pluviométricos anuais compreendida entre 600 a 1.600 mm e chuvas concentradas entre os meses de outubro à março. A temperatura média em torno de 21 a 24°C. O balanço hídrico da bacia caracteriza importantes restrições no que diz respeito à capacidade de armazenamento hídrico do solo (Ferreira; Silva, 2012). A região possui um gradiente altitudinal que varia de 100 m (jusante) a mais de 1.800 m (montante) (Figura 2).



**Figura 2.** Localização da bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha (BHRJ) no contexto do estado de Minas Gerais (Brasil) e sua organização com os principais tributários e bacias de fronteira.

Na porção superior da bacia, ocorrem predominantemente rochas quartzíticas do Supergrupo Espinhaço e rochas metassedimentares do Grupo Macaúbas na parte superior e média da bacia. Granitos e metagranitos e gnaisses pré-cambrianos predominam na porção média para a baixa bacia. Os solos relacionados à presença de afloramentos de quartzitos são Neossolos Litólicos e Argissolos Vermelhos, muito representativos na área. Existem também Planossolos, Cambissolos Háplicos, Latossolos Amarelos, Latossolos Vermelho-Amarelo, Latossolos Vermelhos, Argissolos Vermelho-Amarelo. O relevo apresenta encostas planas (jusante) à acentuadas (montante), com predominância de terrenos ondulados ao longo da bacia.

Os biomas arbóreos são reconhecidos na área, com predominância de Cerrado e Mata Atlântica e menor contribuição da Caatinga, ecorregiões prioritárias para conservação mundial (Scarano; Ceotto, 2015). Parte da bacia do Jequitinhonha está na Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço (RBSE) (Figura 2) por estar no domínio da Serra do Espinhaço Meridional e Norte no estado de Minas Gerais. A região montante caracteriza-se por fitofisionomias do Cerrado, com destaque para as formações campestres, em especial do Campo Rupestre, notadamente no contexto da Serra do Espinhaço (Amaral et al., 2004). Os Campos Rupestres abrigam um dos maiores patrimônios biológicos brasileiros e sua conservação depende do conhecimento amplo e detalhado de suas espécies e dos mecanismos executados na dinâmica de suas populações (Rapini et al., 2008). No Médio e Baixo Jequitinhonha as formações florestais são mais ocorrentes, sendo elas as Florestas Estacional Decidual e Semidecidual.

Em relação aos aspectos socioeconômicos da BHRJ, a população atual é estimada em 789.862 habitantes, grande parte rural (IBGE, 2010). A região, historicamente, tem sofrido os efeitos das atividades antrópicas, como a exploração de áreas para fins minerários e supressão de vegetação para fins agrícolas e florestais. A demanda por ouro e diamante no século 18 foi a principal causa da origem da população da região (Mucida et al., 2019), especialmente no Alto Jequitinhonha (porção sul e sudoeste do BHRJ). O Brasil foi o primeiro país ocidental a produzir diamantes de depósitos aluviais no início do século 18 e grande parte da exploração ocorreu principalmente ao longo do Rio Jequitinhonha (Svisero, 1995).

O rio Jequitinhonha e seus principais afluentes são relevantes como recurso natural e abastecem diretamente mais de 70 de seus 82 municípios (Ferreira; Saadi, 2013). O reflorestamento para fins comerciais também tem destaque para o contexto da área de estudo. O Vale do Jequitinhonha conta com aproximadamente cerca de 176.656,02 hectares de povoamentos de eucalipto, presente em cerca de 17 municípios da região (Borges et al., 2018), considerando que o estado de Minas Gerais tem a maior área com plantios de eucalipto do Brasil, representa de 28% (1.920,329 hectares) (IBÁ, 2020).

## PLANOS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E PROCESSAMENTOS

O estudo determinou Fragilidade Ambiental Potencial (FAP) e Fragilidade Ambiental Emergente (FAE) de acordo com a metodologia de Ross (1994; 2012), que exigiu um conjunto de dados ambientais e espaciais integrados para avaliar a área de estudo. Usamos seis planos de informações geográficas de bancos de dados públicos e gratuitos para BHRJ: Modelo Digital de Elevação, Classes de Solos, Domínios Geológicos, Precipitação e Hierarquia Fluvial para o mapeamento da FAP, além de Uso e Cobertura do Solo, para geração do mapa de FAE (Tabela 1).

**Tabela 1.** Informações espaciais/planos de dados, fontes de aquisição e método aplicado ao conjunto de dados.

| Planos de Informações                 | Base de dados   | Tipo de dado ou método                 |
|---------------------------------------|---|--|
| Modelo Digital de Elevação (MDE/SRTM) | Earth Explorer (USGS) ( <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> )                                       | Matricial                              |
| Classes de Solos                      | Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) ( <a href="http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/">http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/</a> ) | Vetorial                               |
| Domínios Geológicos                   | Serviço Geológico do Brasil (CPRM) ( <a href="http://www.cprm.gov.br/en/">http://www.cprm.gov.br/en/</a> )                                    | Vetorial                               |
| <sup>1</sup> Pluviosidade             | Atlas Pluviométrico do Brasil (CPRM) ( <a href="http://www.cprm.gov.br/en/">http://www.cprm.gov.br/en/</a> )                                  | <i>Inverse Distance Weighted (IDW)</i> |
| Hierarquia Fluvial                    | Derivado do MDE / SRTM ( <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> )                                      | Método de Strahler                     |
| <sup>2</sup> Cobertura e uso do solo  | MapBiomas – Coleção 4.1 ( <a href="https://mapbiomas.org/">https://mapbiomas.org/</a> )   | Matricial                              |

<sup>1</sup> Isoietas de Precipitações Médias Anuais entre 1977 e 2006.

<sup>2</sup> Dado obtido referente ao ano 2018, a partir da base de dados do Projeto MapBiomas, uma iniciativa brasileira multi-institucional para gerar mapas anuais de cobertura e uso do solo a partir de processos de classificação automática aplicada a imagens de satélite (MapBiomas, 2020; Souza Jr., 2020).

A informação cartográfica foi processada e analisada em ambiente SIG, com auxílio do software ArcGIS 10.5. O referencial geodésico do estudo foi o WGS 1984, e o sistema de projeção Universal Transverse Mercator para a zona 23S. Para cada critério foram estabelecidos pesos/coeficientes das

classes de fragilidade ambiental, de acordo com a avaliação técnica de suas características: 1 (Baixa), 2 (Levemente Baixa), 3 (Média), 4 (Alta) e 5 (Extremamente alta) (Ross, 1994; Ross, 2012; Massa; Ross, 2012; Manfré et al., 2013; França, 2018). Na Tabela 2 são apresentadas as descrições das classes de fragilidade de acordo com os respectivos pesos. A ponderação dos níveis de fragilidade para cada tema relaciona-se à resistência aos processos erosivos, sedimentação e risco de degradação, considerando características individuais de cada critério e dos fatores externos que podem influenciar na sua maior ou menor fragilidade.

**Tabela 2.** Classes de fragilidade e seus respectivos pesos e descrições. Adaptado de: Ross (1994); Ross (2012); Massa e Ross (2012); Manfré et al., (2013) e França (2018).

| <b>Classes</b>    | <b>Pesos</b> | <b>Descrição das classes</b>  |
|-------------------|--------------|---|
| Baixa             | 1            | Alto potencial de resiliência e equilíbrio dinâmico.  |
| Levemente Baixa   | 2            | Condições morfodinâmicas estáveis na paisagem com pelo menos uma característica ambiental que não a incluem na classe Baixo/Peso 1.   |
| Média             | 3            | Fragilidade em transição das classes inferiores para as superiores; uma categoria de alerta para os riscos de degradação ambiental. Têm restrições moderadas ao uso de recursos naturais e ao uso antrópico. Alguns dos parâmetros analisados determinam este nível de fragilidade.   |
| Alta              | 4            | Alta restrição ao uso de recursos naturais e uso da terra, mais suscetível a formas de degradação do que a classe 3. Uma combinação de fatores condicionantes determina este nível de fragilidade ambiental, exigindo avaliações cuidadosas para a implementação de qualquer empreendimento ou intervenção antrópica a fim de minimizar o impacto ou priorizar a conservação ou proteção. |
| Extremamente Alta | 5            | Áreas instáveis, com extrema sensibilidade ambiental. Têm restrições severas para o uso dos recursos naturais e do uso da terra. A combinação de parâmetros biogeofísicos ou morfodinâmicos pode levar à erosão do solo e à degradação ambiental - áreas de relevante interesse para a conservação florestal e da biodiversidade.   |

## DETERMINAÇÃO DOS PESOS POR AHP E VERIFICAÇÃO DE CONSISTÊNCIA

Utilizamos o método AHP de auxílio à decisão multicritério, uma técnica de análise de decisão e planejamento de múltiplos indicadores, em que sua aplicação reduz o estudo de sistemas complexos a uma sequência de comparações a pares de componentes devidamente identificados (Saaty, 1980). Segundo Saaty (2008) algumas condições são necessárias para a correta aplicação do método: (i) Definição do problema e objetivo a ser alcançado; (ii) Estruturação dos indicadores em forma de hierarquia; (iii) Construção de uma matriz quadrada para comparação de pares e; (iv) Atribuição de peso a cada um dos indicadores, em uma escala de 1 a 9, de acordo com a escala básica referente à comparação dos fatores (Tabela 3). Os aspectos matemáticos dessas condições podem ser vistos com maior detalhamento em França et al. (2020b).

**Tabela 3.** Escala fundamental de preferências no processo de comparação de pares de acordo com Saaty (1980; 2008). Julgamentos verbais das preferências entre a alternativa  $i$  e a alternativa  $j$ .

| Valor $a_{ij}$                    | Definição   | Explicação   |
|-----------------------------------|---|--|
| 1                                 | $A_i$ é igualmente importante quanto $A_j$  | Os objetos $i$ e $j$ são de igual importância  |
| 3                                 | $A_i$ é um pouco mais importante do que $A_j$   | O objeto $i$ é pouco mais importante do que o objeto $j$   |
| 5                                 | $A_i$ é fortemente mais importante do que $A_j$   | A experiência e os julgamentos indicam que o objeto $i$ é fortemente mais importante do que o objeto $j$   |
| 7                                 | $A_i$ é muito mais importante do que $A_j$  | O objeto $i$ é muito forte ou demonstravelmente mais importante do que o objeto $j$  |
| 9                                 | $A_i$ é extremamente mais importante do que $A_j$   | O objeto $i$ é absolutamente mais importante do que o objeto $j$   |
| 2,4,6,8                           | Valores intermédios   | Valores intermédios, por exemplo, um valor de 8 significa que o objeto $i$ está a meio caminho entre forte e absolutamente mais importante do que o objeto $j$ |
| *Reciprocidades dos números acima | Se uma atividade tem um dos números acima (por exemplo, 3) comparado com uma segunda atividade, então a segunda atividade tem valor recíproco (isto é, $1/3$ ) quando comparada com a primeira. |  |



O método requer atender 3 pressupostos matemáticos: Reciprocidade (Se  $a_{ij} = x$ , então  $a_{ji} = 1/x$ , com  $1/9 \leq x \leq 9$ ); Homogeneidade (Se os elementos  $i$  e  $j$  são considerados igualmente importantes, então,  $a_{ij} = a_{ji} = 1$ , além disso  $a_{ii} = 1$  para todo  $i$ ; e Consistência (Índice e Razão de Consistência devem ser  $\leq 0,10$  ou 10%) (Saaty, 1980).

Verificamos a taxa de consistência da avaliação AHP realizada no estudo. A verificação de consistência visa verificar a ponderação dos tomadores de decisão. Assim, o cálculo do índice de consistência (Saaty, 2008) é dado pela Equação 1, onde CI é o Índice de Consistência;  $n$  é o número de indicadores avaliados;  $\lambda_{max}$  é o maior autovalor obtido da decomposição em autovalores e autovetores.

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

O autovetor  $w$  associado ao maior autovalor ( $\lambda_{max}$ ) é obtido resolvendo a expressão ( $Aw = \lambda_{max} w$ ), sujeito à restrição que  $\sum wi = 1$  (Saaty, 2003).

Dessa forma, se os julgamentos são consistentes, então  $\lambda_{max}$  se aproxima de  $n$ , assim é possível verificar se o valor encontrado do Índice de Consistência (IC) é adequado. Saaty (2008) propôs uma Relação ou Razão de Consistência (RC), determinada pela razão entre o valor do Índice de Consistência (IC) e o índice de consistência aleatória ou Índice Randômico (IR) (Saaty, 1980), que varia de acordo com  $n$ , que é a quantidade de objetos empregada nas comparações paritárias. A matriz é considerada consistente se a razão for  $< 0,1$  ou 10% Saaty (1980; 2008). A relação é mostrada na equação (2), onde  $IR$  é um valor constante e depende da dimensão da matriz que se está comparando, ou seja, do número de indicadores avaliados. Os valores de IR devem ser verificados de acordo com o tamanho ( $n$ ) da matriz, e a tabela de verificação pode ser encontrada em Saaty (1990).

$$RC = \frac{IC}{IR} \leq 0,1 \sim 10\% \quad (2)$$

Se encontrados valores de RC superiores a 0,10 (10%), é necessário, recorrer aos especialistas que participaram da ponderação da matriz AHP, a fim de realizar novos julgamentos. Além disso, a ponderação AHP também só será consistente somente se  $\lambda_{max} \geq n$  (Saaty, 1991).

## ANÁLISE MULTICRITÉRIO (AMC)

A elaboração dos mapas síntese de FAP e FAE para a área de estudo foi determinada pelo estabelecimento dos pesos AHP e AMC usando o método de sobreposição ou soma ponderada dos

parâmetros utilizados. O processo multicritério usado foi o *Weighted Linear Combination* ou Combinação Linear Ponderada (CLP daqui em diante), que é um dos métodos mais utilizados na AMC devido a sua praticidade e eficiência (Voogd, 1983; Nzeyimana et al., 2014; Rodríguez-Merino et al., 2020). Para executar o CLP e obtenção dos mapas finais, cada camada ou critério normalizado foi multiplicado pelo seu respectivo peso obtidos no modelo AHP e então somadas (operações realizadas *pixel a pixel*), obtendo um único plano de informação de saída para cada abordagem (FAP e FAE) (*Raster Calculator*), classificado nas cinco classes de fragilidade, de 1 a 5 (Tabela 2), de acordo com a Equação 3, em que:  $S$  é o valor final de fragilidade ambiental (para FAP e FAE);  $w_i$  o peso do fator para o  $i$ -ésimo critério, obtidos no método AHP; e  $x_i$  é o valor da célula normalizada ou padronizada do  $i$ -ésimo critério.

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (3)$$

O mapa de saída foi reclassificado usando o método *Jenks* (quebras naturais) no software de GIS utilizado, que identifica pequenas quebras nos conjuntos de dados agrupando valores semelhantes (Slocum et al., 2008; Liu; Li, 2019; Rodríguez-Merino et al., 2020). No caso da BHRJ, confeccionou-se os mapas de entrada para a análise no modelo multicritério para a BHRJ, com suas devidas classes, áreas quantificadas e demais informações pertinentes a compreensão das características que condicionam a fragilidade ambiental (Figura 3). Os pesos atribuídos para fragilidade ambiental dos subcritérios de cada camada foram implementados de acordo com fundamentação técnica e baseado na literatura especializada para cada tema (Tabela 4).

Quanto à declividade do terreno, cinco subdivisões compuseram a área (Figura 3A). Verificamos a ocorrência de terrenos planos a escarpados em declive com predominância dos ondulados de 12 a 30%, representando 25,4 % da área total (16.606,84 km<sup>2</sup>). Seguido das declividades de 6 a 12%; 0 a 6%; 20 a 30% e maiores que 30%, que representam respectivamente em extensão da área de estudo os percentuais de 24,2%, 22,8%, 18,3% e 9,2%, respectivamente. Este fator está diretamente relacionado a processos erosivos, movimentação de massas e favorecimento de escoamento superficial das águas.

No mapeamento dos domínios geológicos, verificamos a presença de sete classes (Figura 3B), que se apresentam de acordo com os valores de vulnerabilidade sugeridos por Crepani et al. (2001) e Quartaroli et al., (2013). Este fator é fundamental para o entendimento da morfodinâmica da unidade de paisagem natural, pois compreende informações relativas à história da evolução geológica do ambiente onde a unidade encontra-se e as informações relativas ao grau de coesão das rochas que a compõem.

No mapeamento da hierarquia fluvial, a BHRJ possui predominância de canais fluviais de 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> ordens, 11.058,10 km e 5.491,64 km, respectivamente (Figura 3C). Verificamos hierarquia fluvial de até 7<sup>a</sup> ordem, de acordo com o método de classificação de Strahler (1952). Na análise de fragilidade ambiental de bacias hidrográficas, esse fator tem importância à medida que há maior participação de canais de

primeira ordem. Drenagens de primeira ordem indicam uma maior instabilidade do ambiente e representam os setores de desenvolvimento das bacias de drenagem onde os processos morfodinâmicos associados à dissecação são mais intensos (Christofoletti, 1980; Tucker et al., 2010).

Quanto a pedologia regional e de acordo com a classificação do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS), a área de estudo apresenta predominância de 22,98% por Argissolos Vermelhos (~15.238,04 km<sup>2</sup>) e 19,98% por Argissolos Vermelho-Amarelo (~13.253,57 km<sup>2</sup>) e 14 % de Neossolos Litólicos (~9.035,3 km<sup>2</sup>) na BHRJ (Figura 3.D). Este fator é fundamental na análise da fragilidade ambiental, pois a susceptibilidade do solo apresenta variações dependendo da sua natureza pedológica, a qual influencia diretamente suas características e propriedades físicas, químicas e biológicas, além de ser elemento físico que sofre diretamente a ação erosiva/degradativa.

A área apresenta isoietas de precipitação média anual que variam de 800 mm no Baixo Rio Jequitinhonha a 1.300 mm no Alto Rio Jequitinhonha, considerando uma série histórica de aproximadamente 30 anos utilizada neste estudo (CPRM, 2013) (Figura 3.E). Este fator é um agente ativo sobre os processos de escoamento superficial e favorecimento de erosões.

O uso e cobertura da terra da BHRJ (Figura 3.F) apresenta predominância das classes de Pastagem (39,18% ou 25.576,02 km<sup>2</sup>), Formação Savânica (21,07% ou 13.758,73 km<sup>2</sup>), Formação Florestal (17,25% ou 11.262,93 km<sup>2</sup>), mosaico de Agricultura e Pastagem (6,90 % ou 4.506,01 km<sup>2</sup>), Cultura semi-perene (5,79% ou 3.780,69 km<sup>2</sup>), Florestas Plantadas (4,20% ou 2.745,19 km<sup>2</sup>) e Formação Campestre (3,82% ou 2.495,4 km<sup>2</sup>). As demais classes correspondem à: Outra Formação Natural não Florestal (3,56 km<sup>2</sup> ou 0,01%); Cultura Anual e Perene (163,62 km<sup>2</sup> ou 0,25%); Infraestrutura Urbana (37,18 km<sup>2</sup> ou 0,06%); outra área não vegetada (181,14 km<sup>2</sup> ou 0,28%); Afloramento Rochoso (157,13 km<sup>2</sup> ou 0,24%); Mineração (2,64 km<sup>2</sup>); Hidrografia (616,16 km<sup>2</sup>). Essa camada (Figura 3.F) foi derivada a partir de dados oficiais, de acesso aberto e alta precisão provenientes da Plataforma brasileira MapBiomas - Coleção 4.1 (MapBiomas, 2020), um projeto não governamental considerado uma das principais e maiores iniciativas no mundo em mapeamento da dinâmica de cobertura e uso do solo (resolução espacial de 30 m), com uma série histórica de todo o país desde 1985 até os dias atuais. O mapeamento realizado pelo Projeto MapBiomas é baseado em computação em nuvem e armazenamento de dados e tem sido amplamente utilizado em diversas aplicações científicas (Amaral et al., 2020; Souza Jr. et al., 2020; Schimidt; Eloy, 2020; Fenderich et al., 2020; Costa et al., 2021; Hernandez et al., 2021; Couto Junior et al., 2021).

Visão Geral

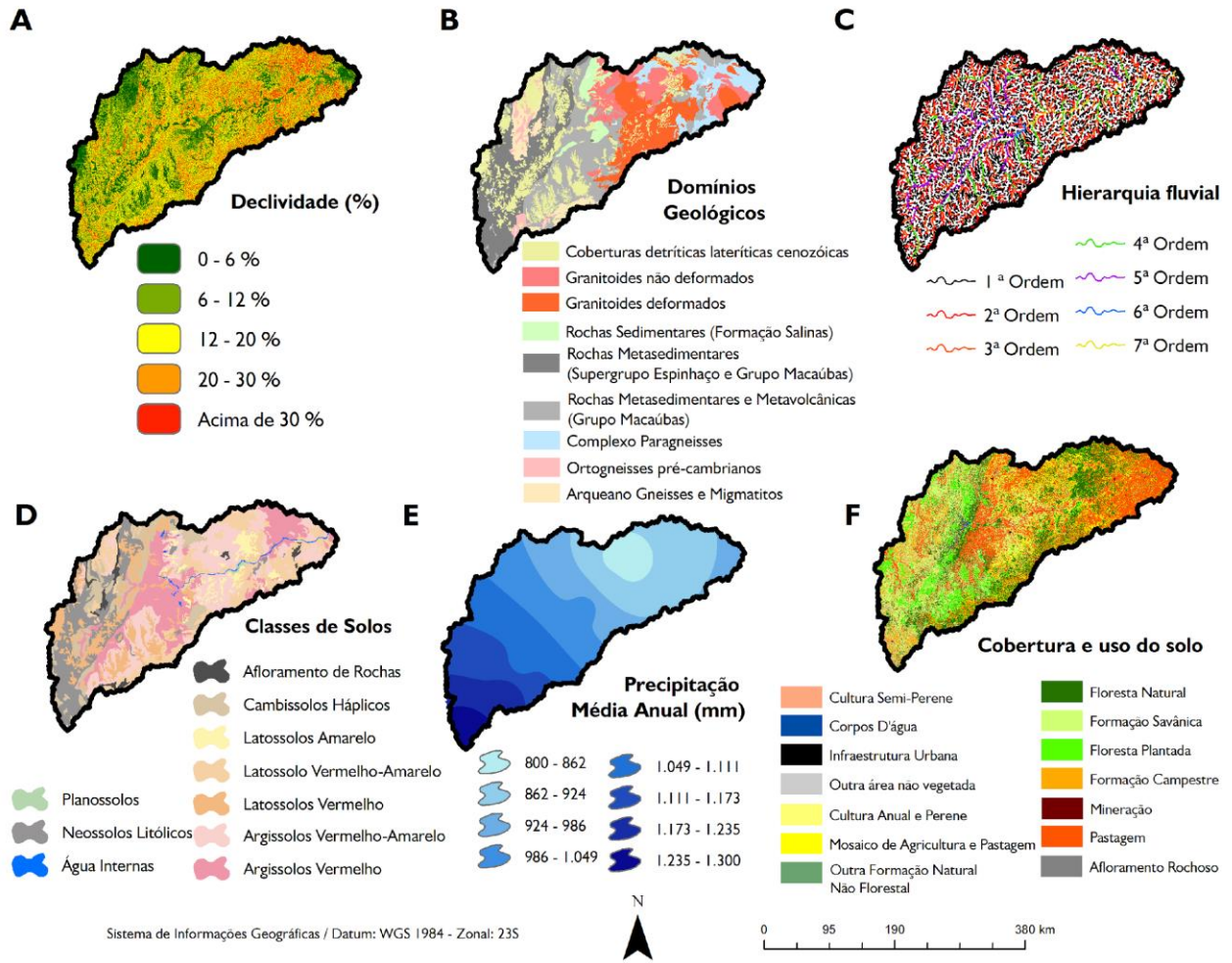


Figura 3. Indicadores avaliados e estudados para a geração da fragilidade ambiental da BHRJ.

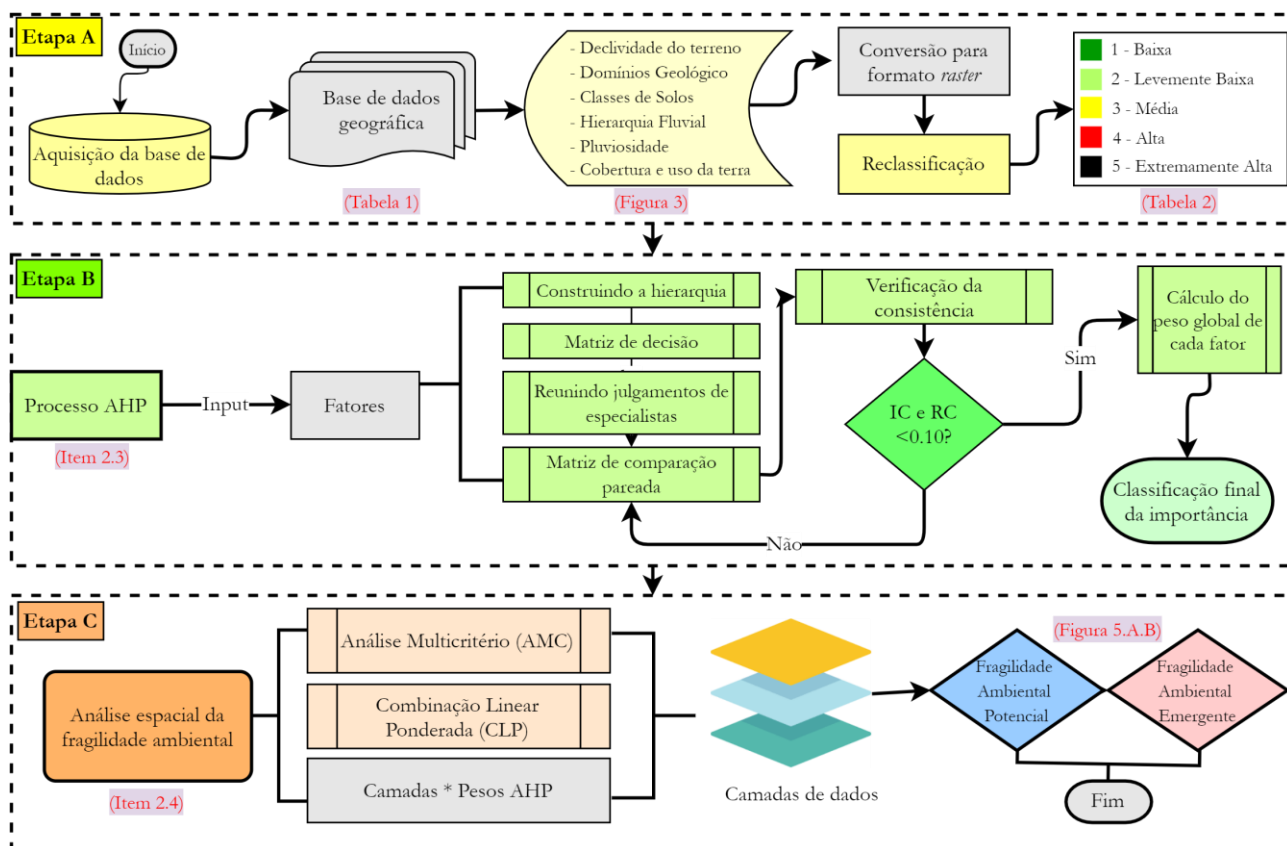
**Tabela 4.** Classes e pesos de fragilidade atribuídos aos fatores considerados para a BHRJ.

| Peso | Classes de fragilidade dos critérios e subcritérios |  |  |   |                                |  |
|------|---|--|--|---|--------------------------------|--|
|      | Figura 5-A  | Figura 5-B   | Figura 5-C   | Figura 5-D                                      | Figura 5-E                     | Figura 5-F   |
|      | <sup>1</sup> Declividade (%)                        | Domínios Geológicos  | Hierarquia Fluvial                                       | <sup>2</sup> Classes de Solos                   | <sup>3</sup> Precipitação (mm) | <sup>4</sup> Cobertura e Uso do Solo   |
| 1    | 0 – 6%.   | Granitoides deformados; Ortognais-ses pré-cambrianos; Complexo Paragnaisses e; Granitoides deformados.           | 5 <sup>a</sup> , 6 <sup>a</sup> e 7 <sup>a</sup> Ordens. | Latosolos Vermelhos.                            | 800 – 899.<br>899 – 999.       | Formação Florestal.  |
| 2    | 6 – 12%.  | Gnaisses e migmatitos arqueanos; Rochas Metassedimentares e Metavulcânicas (Grupo Macaúbas).                     | ---  | Latosolos Amarelo e Latosolos Vermelho-Amarelo. | ---                            | Outra Formação Natural Não Florestal.  |
| 3    | 12 – 20%.   | Rochas Metassedimentares (Supergrupo Espinhaço e Grupo Macaúbas).<br><br>Rochas Sedimentares (Formação Salinas). | 3 <sup>a</sup> e 4 <sup>a</sup> Ordens.                  | Argissolos Vermelho-Amarelo.                    | 999 – 1.098.                   | Florestas Plantadas; Formação Savânica; Cultura Anual e Perene; Cultura Semi-Perene. |
| 4    | 20 – 30%.   | Coberturas detríticas lateríticas cenozoicas.  | 2 <sup>a</sup> Ordem.                                    | Cambissolos Háplicos e Planossolos.             | 1.098 - 1.198<br>1.198 -1.300  | Pastagens; Mosaico de Agricultura e Pastagens.                                       |
| 5    | > 30%.  | ---  | 1 <sup>a</sup> Ordem.                                    | Argissolos Vermelho;                            | ---                            | Afloramento Rochoso; Mineração;  |

| Peso | Classes de fragilidade dos critérios e subcritérios |                     |                    |   |                                |  |
|------|---|---------------------|--------------------|---|--------------------------------|--|
|      | Figura 5-A  | Figura 5-B          | Figura 5-C         | Figura 5-D                                  | Figura 5-E                     | Figura 5-F   |
|      | <sup>1</sup> Declividade (%)                        | Domínios Geológicos | Hierarquia Fluvial | <sup>2</sup> Classes de Solos               | <sup>3</sup> Precipitação (mm) | <sup>4</sup> Cobertura e Uso do Solo                                     |
|      |   |                     |                    | Neossolos Litólicos e; Afloramento Rochoso. |                                | Infraestrutura Urbana; Formação Campestre e; Outras áreas não vegetadas. |

(---) Nenhuma ocorrência; (<sup>1</sup>Grau de declive: Ross, 1994; 2012; <sup>2</sup>Classes de Solo: Ross, 1994; 2012; Embrapa, 2015; <sup>3</sup>Pluviosidade (mm): Ross, 1994; 2012; Valle et al., 2016; <sup>4</sup>Cobertura e Uso do Solo: Ross, 1994; 2012; Valle et al., 2016; Yoshida; Stolf, 2019).

As etapas relacionadas aos procedimentos metodológicos utilizados são apresentadas no fluxograma na Figura 4. Em França et al., (2020b) encontra-se um maior detalhamento matemático das etapas metodológicas do modelo AHP realizadas neste estudo.



**Figura 4.** Procedimentos metodológicos para análise da Fragilidade Ambiental Potencial (FAP) e Emergente (FAE) (Fonte: os autores, 2020).

Baseados nos resultados obtidos no mapeamento da fragilidade ambiental da BHRJ, apresentamos uma seção dedicada à proposição de um zoneamento ambiental que correlaciona os resultados de FAE com boas práticas conservacionistas de uso da terra. O zoneamento é baseado nas categorias de fragilidade ambiental emergente, risco de degradação e potencial de resiliência da paisagem, de acordo com recomendações da literatura científica especializada (Lal, 1997; Manfré et al., 2013; Castro et al., 2015; Cruz et al., 2017; Anjinho et al., 2021) e visa oferecer aos gestores públicos e privados alternativas relacionadas à conservação ambiental e progresso socioeconômico.

# Resultados

## ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP)

Os fatores foram hierarquizados de acordo com a importância de cada fator no modelo AHP. O resultado da matriz pareada é apresentado na Tabela 5. Encontramos o ‘uso e cobertura da terra’ como fator de maior relevância nesta avaliação AHP no contexto de fragilidade ambiental, representando 40% (peso = 0,40) de importância para compor o modelo de avaliação multicritério, seguido os fatores por ordem de importância, respectivamente: Declividade (27% ou peso = 0,27), Pluviosidade (16% ou peso = 0,16); Hierarquia Fluvial (10% ou peso = 0,10); Pedologia (5% ou 0,05%) e; Domínios Geológicos (2% ou peso = 0,02).

**Tabela 5.** Matriz de comparação pareada entre os parâmetros do estudo.

|                   | C1   | C2    | C3   | C4    | C5   | C6    | AUTOVETOR | A.N.V. |
|-------------------|------|-------|------|-------|------|-------|-----------|--------|
| C1                | 1    | 6     | 2    | 9     | 5    | 4     | 3,60      | 40%    |
| C2                | 1/7  | 1     | 1/7  | 5     | 1/5  | 1/3   | 0,44      | 5%     |
| C3                | 1/3  | 7     | 1    | 9     | 3    | 3     | 2,40      | 27%    |
| C4                | 1/9  | 1/5   | 1/9  | 1     | 1/9  | 1/7   | 0,18      | 2%     |
| C5                | 1/5  | 5     | 1/3  | 9     | 1    | 3     | 1,44      | 16%    |
| C6                | 1/5  | 3     | 1/3  | 7     | 1/3  | 1     | 0,88      | 10%    |
| Soma ( $\Sigma$ ) | 1,99 | 22,20 | 3,92 | 40,00 | 9,64 | 11,48 | 8,93      | 100%   |

**\*Fatores – C1:** Cobertura e Uso da Terra; **C2:** Pedologia ou Classes de Solos; **C3:** Declividade; **C4:** Domínios Geológicos; **C5:** Precipitação; **C6:** Hierarquia Fluvial. (A.N.V = autovetor normalizado ou pesos de importância).

O Índice de Consistência (IC) e a Razão de Consistência (RC) foi de 0,09 e 0,07 respectivamente, valores dentro dos limites de coerência e confiabilidade aceitáveis (<0,10) (Saaty, 1980). O valor de  $\lambda_{max}$  calculado também corroborou a adequabilidade das ponderações realizadas, que segundo Saaty (1991) a matriz de resultados será consistente quando  $\lambda_{max} \geq n$ . O valor aqui obtido foi de  $\lambda_{max} = 6,45$ , sendo que no estudo  $n = 6$ .



## FRAGILIDADE AMBIENTAL POTENCIAL (FAP) E EMERGENTE (FAE)

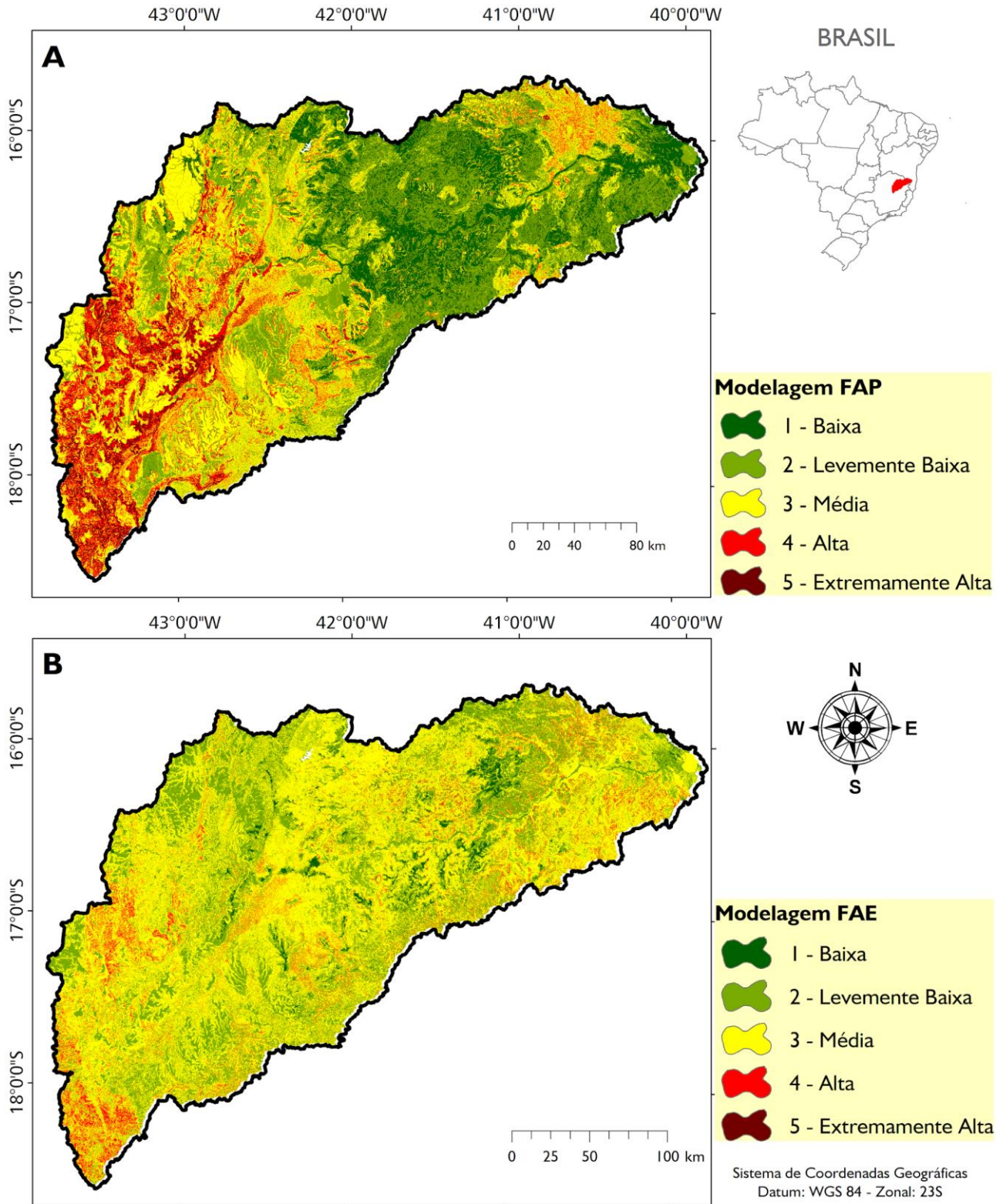
A modelagem multicritério foi executada e geramos os mapas de FAP (Figura 5A) e EFF (Figura 5B) da BHRJ. Constatamos que as áreas com “média” FAP são as mais representativas, correspondendo a 30% ou 19.244,07 km<sup>2</sup> da área total da BHRJ (Tabela 6A). A FAP “extremamente alta” apresentou-se em menor proporção, totalizando a 5,3 % da área total (3.416,15 km<sup>2</sup>). Apesar disso, 16,4% são terrenos com “alta” FAP (10.519,63 km<sup>2</sup>). As classes “baixa” e “levemente baixa” corresponderam a 12.430,57 km<sup>2</sup> e 18.540,93 km<sup>2</sup>, respectivamente.

O mapeamento FAP evidencia a influência da declividade como um importante fator de condicionamento da fragilidade. Os declives de 12 a 20% ocupam 25,4% da BHRJ. De toda a área de estudo, um total de 9,2% apresenta declividades acima de 30%, classificadas como fragilidade “extremamente alta”.

O mapa final da FAE (Figura 5B), gerado a partir da análise de sobreposição entre o mapa de FAP e o mapa de uso e cobertura da terra, fornece uma melhor perspectiva e reflexo dos impactos ambientais das ações antrópicas sobre o território. A Figura 5B apresenta a distribuição espacial da FAE e a Tabela 6B a quantificação das áreas de FAE da bacia hidrográfica.

A classe “média” EFF também é predominante na bacia, ocupando aproximadamente 34.503,55 km<sup>2</sup> ou 53,78% da área total. Essa classe tem relação direta com o grau de proteção da terra. Em ambos os mapeamentos de fragilidade ambiental a classe “média” manteve predominante, com 30 % para FAP e elevação para 53,78% para FAE (Tabela 6A e 6B).

Visão Geral



**Figura 5.** Mapas de Fragilidade Ambiental Potencial (FAP) (A) e Fragilidade Ambiental Emergente (FAE) (B), Bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil.

**Tabela 6.** Área calculada de acordo com as classes de **(A)** FAP e **(B)** FAE.

| Classes de Fragilidade | <b>(A) FAP</b>          |                 | <b>(B) FAE</b>          |                 |
|------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
|                        | Área (km <sup>2</sup> ) | Porcentagem (%) | Área (km <sup>2</sup> ) | Porcentagem (%) |
| (I) Baixa              | 12.430,57               | 19,38           | 1.646,90                | 2,57            |
| (II) Levemente Baixa   | 18.540,93               | 28,90           | 21.399,14               | 33,36           |
| (III) Média            | 19.244,07               | 30,00           | 34.503,55               | 53,78           |
| (IV) Alta              | 10.519,63               | 16,40           | 6.305,45                | 9,83            |
| (V) Extremamente Alta  | 3.416,15                | 5,33            | 296,27                  | 0,46            |
| Total                  | 64.151,35               | 100             | 64.151,35               | 100             |

# Discussão

---

## ANÁLISE DO MODELO AHP

A execução do modelo AHP neste estudo foi fundamental na obtenção da hierarquia de importância dos parâmetros avaliados para a BHRJ, por empregar avaliações qualitativas e subjetivas como fatores quantitativos consistentes para a avaliação AMC-CLP. Encontramos como fator de maior impacto na análise o ‘uso e cobertura da terra’, com 40% de importância no modelo.

O ‘uso e cobertura da terra’ é um parâmetro fundamental no entendimento da fragilidade ambiental de ecossistemas (FNilson; Grelsson, 1995; Anjinho et al., 2021). No conjunto dos indicadores ambientais considerados, este fator tem relação direta com os impactos gerados ao solo, à cobertura vegetal e aos recursos da terra, sendo ele determinante para maior ou menor fragilidade e risco de degradação ambiental.

O fator ‘declividade’ apresentou a segunda maior importância (27%) na avaliação do modelo pois se correlaciona diretamente com processos erosivos, movimentação de massas e pelo favorecimento de escoamento superficial das águas (Lowe et al., 2021).

O fator ‘pluviosidade’ apresentou a terceira maior importância (16%) na avaliação do modelo. A pluviosidade é um agente ativo sobre os solos e declividade no favorecimento de processos de escoamento superficial e erosões. A erosão do solo pela água é um dos processos de degradação do solo mais severos (Zambom et al., 2021). A região da BHRJ (especialmente no alto Rio Jequitinhonha – Porção Sudoeste – Figura 5) apresenta alto volumes de chuvas durante o verão (>1.300 mm/ano), esse fator potencializa a vulnerabilidade ambiental dessa região e justifica a ordem de importância desse fator no estudo.

O fator ‘hierarquia fluvial’ apresentou a quarta maior importância (10%) na análise AHP, devido à predominância de canais fluviais de 1ª e 2ª ordens. Quanto maior a participação percentual de canais de primeira ordem, maior deverá ser a fragilidade potencial do relevo. Quando analisado a formação geológica do terreno, sobretudo nas zonas planálticas como no caso da BHRJ, junto à sua configuração da hierarquia de drenagens, nota-se a captura de drenagem ocorrer naturalmente, sendo responsável pelo surgimento de processos erosivos (erosão regressiva) (Figura 6F) (Godard et al., 2010) no planalto e o transporte de material pelas vertentes até a planície. Tal processo reforça a importância de considerar as condições naturais da paisagem em estudos relacionados à vulnerabilidade ambiental de áreas, principalmente quando trata-se de áreas sob alguma influência direta de cursos d’água.

O fator ‘classe de solos’ ou pedologia, apesar de ser o elemento que sofre diretamente a ação erosiva/degradativa, tendo relação direta com a fragilidade ambiental em acordo com suas condições físicas e químicas, apresentou baixa relevância (5%) entre os fatores considerados. Isto se explica

principalmente em função da escala de mapeamento utilizada e desenvolvida para o estado de Minas Gerais (1:500.000), pelo nível de detalhamento das classes de solos que não possibilitam afirmações mais precisas sobre as fragilidades envolvidas. Apesar dos avanços tecnológicos no mapeamento pedológico do Brasil, apenas 1% do território brasileiro possui mapas de solos na escala de 1: 25.000 (Carvalho et al., 2015).

Finalmente, o fator dos ‘domínios geológicos’ apresentou a menor contribuição na análise AHP (2%), embora seja a base de todos os demais fatores físicos da paisagem, é um fator sob predominância de uma condição estática, quando comparada aos demais fatores. Apesar disso, a consideração da geologia é fundamental para o entendimento do comportamento da estabilidade terrestre. As características geológicas conjuntamente com as variações de altimetria e declives acentuados, são um fator crítico que controla o escoamento de uma bacia hidrográfica e, portanto, afetam a intensidade do intemperismo e erosão dos solos (Derakhshan-Babaei et al., 2020).

## **IMPLICAÇÕES PRÁTICAS DA FAP E FAE**

A análise da FAP indica que a BHRJ apresenta predominância “média” de vulnerabilidade à erosão dos solos e degradação ambiental. Essa condição ocorre principalmente em decorrência da pedologia regional, como a presença de solos de textura predominantemente média, como os Neossolos Litólicos (Figura 3D), que permeiam e predominam grande parte da porção sul e sudoeste da bacia (região da Serra do Espinhaço) (Figura 2B). Além disso, a pluviosidade é mais intensa (Figura 3E) e a declividade do terreno ondulado (Figura 3A), conseqüentemente ocorre uma potencialização da fragilidade ambiental dessas áreas. A grande quantidade de drenagens de 1ª e 2ª ordem nesta região (alto rio Jequitinhonha) (Figura 3C), zona com muitas nascentes de rios também reflete o resultado da FAP. Além destas características, esta porção com as maiores taxas de FAP (Figura 5A), em geologia, faz parte do grupo das rochas metassedimentares, para a região do Supergrupo Espinhaço e Grupo Macaúbas (Figura 3B).

A classe “média” de FAP requer muita atenção quanto ao desenvolvimento de práticas antrópicas de uso da terra, por se tratar de uma classe de transição para as altas fragilidades. A classe “média” correspondeu, individualmente, a 30% do território na avaliação da FAP, sendo elevada na avaliação FAE, uma vez que recebeu influência direta de importantes atividades antrópicas e grau de proteção da terra.

Muitos sítios com elevadas classes de FAP também estão relacionados a terrenos declivosos. Parte destes sítios são caracterizados como Áreas de Uso Restrito (AUR) ( $>25^\circ$  e  $<45^\circ$ ) e Áreas de Preservação Permanente (APP) de encostas ( $>45^\circ$ ), segundo o Código Florestal Brasileiro, Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que destinam essas áreas à proteção e conservação da vegetação nativa, em virtude da sua suscetibilidade aos processos erosivos (BRASIL, 2012).

A seguinte classe mais prevalente é a classe “levemente baixa” FAE, que ocupa 33,36% da bacia e é encontrada em áreas de baixa suscetibilidade natural à erosão associadas principalmente a plantações ocorrentes na região (Culturas anuais perenes e semiperenes), e formações vegetais naturais e plantadas, como as matas ciliares, fragmentos florestais naturais, a formação savânica (Bioma Cerrado) e à presença de cobertura vegetal associada às plantações de eucalipto.

A FAP está relacionada à susceptibilidade do ambiente em condição de submissão a intervenções ou perturbações antrópicas. Quando o equilíbrio dinâmico é quebrado, o sistema pode entrar em colapso, passando para uma situação de susceptibilidade à degradação ambiental (Sporl; Ross, 2004; Albaladejo et al., 2021). Em parte da bacia do Jequitinhonha há relatos de degradação ambiental desde o século XVIII (Lopes et al., 2011; Mucida et al., 2019) As unidades de FAP estão associadas aos ambientes estáveis que se encontram em condições de equilíbrio dinâmico, portanto, que foram menos afetados em sua estrutura e funcionamento, pelas atividades humanas. Mas, embora apresentem condições de ambientes estáveis, possuem instabilidade potencial qualitativamente previsível face às suas características naturais e ao desenvolvimento das atividades humanas. Esta observância é melhor compreendida quando analisado o mapeamento da FAE.

O estudo constata que 53,78% da bacia são áreas de “média” FAE, e apenas 2,57% são áreas de *baixa* FAE, comparativamente ao mapeamento da FAP, houve aumento expressivo de classe “média” e redução expressiva da categoria “baixa”. Esse resultado demonstra o impacto que as mudanças no uso da terra podem causar no meio ambiente, sobretudo com as atividades de agricultura e pastagens ocorrentes na região (Figura 6G e 6I). A pastagem é o uso da terra dominante por área no Brasil, com área estimada de 167.478.780,40 hectares, e a agricultura o segundo uso da terra mais dominante no país com 64.753.699,94 ha (MapBiomas, 2020; Mello et al., 2020).

O aumento em área da classe média FAE em relação à “média” FAP pode ser explicado pela ocorrência de muitas áreas de campos, agricultura e pastagens. O estudo também constatou, especialmente nas zonas sul, sudoeste e sudeste da BHRJ, a existência de manchas de “alta” e “extremamente alta” fragilidade tanto para FAP e FAE. Uma parte dessa elevada fragilidade está associada a ocorrência de mosaico de afloramento rochoso com solos frágeis e vegetação campestre, especialmente a ocorrência dos ecossistemas nomeados de Campos Rupestres (Morellato; Silveira, 2018; Mucina, 2018; Garcia et al., 2020; Santos et al., 2020), zonas naturalmente sensíveis e frágeis. Ribeiro e Freitas (2010) destacam que os complexos rupestres apresentam alta riqueza de espécies em escala local e regional e numerosos relictos e endemismos. Essas áreas apresentam um alto índice de erosão, com elevadas perdas por lixiviação, em virtude das elevadas altitudes, do relevo movimentado desta região e da pouca espessura do *solum*, associados à pobreza do material de origem, especialmente nas áreas de rochas quartzíticas (Schaefer et al., 2016). A antropização desses ambientes nestas condições pode ocasionar problemas ambientais irreversíveis devido a baixa resiliência da vegetação.

As áreas de “alta” e “extremamente alta” FAE cobriram 9,83% e 0,46% da bacia, respectivamente, e estão associadas principalmente às áreas que já eram consideradas de alta fragilidade em FAP, e são influenciadas por mosaicos de agricultura e pastagens, a aglomerações urbanas, a formação campestre, à sítios de mineração (Morandi et al., 2018), a um mosaico de solos naturalmente frágeis (Lages et al., 2017), afloramento de rochas e diretamente relacionadas à sítios com alguma exposição do solo, não vegetados (Silveira et al., 2018).

Uma outra parte da alta fragilidade nesta porção territorial em ambos os mapeamentos, está associada à projeção dos cursos d’água (Alves et al., 2017). Esse fato reforça a importância da cobertura florestal em bordaduras dos cursos hídricos na região (Morandi *et al.* 2018), sobretudo com a existência das Áreas de Preservação Permanentes (APP) cuja vegetação deve ser mantida, conforme o Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012).

Na região mais susceptível à degradação ambiental predominam atividades minerárias, com destaque para a exploração de diamante, ouro, quartzo e, especialmente, pedras coradas (Karfunkel et al., 1994). Embora menos expressivos, sobressaem o setor industrial nos ramos alimentício, cerâmico e têxtil, e a silvicultura, concentrando-se também no alto e médio curso do rio Jequitinhonha (Porção sudeste da BHRJ). Todas essas atividades necessitam de planos de controle e monitoramento da degradação ambiental, embora essa área seja menor, a exploração desordenada pode contribuir para impactar áreas adjacentes elevando o impacto ambiental na paisagem.

A FAE destaca a importância da cobertura vegetal sobre o território, principalmente nas áreas com “média” à “alta” fragilidade ambiental. A cobertura do terreno é uma importante proteção da paisagem contra os processos morfogenéticos que se traduzem na forma de erosões (Crepani et al., 2001; Kidane et al., 2019). Quando o solo é protegido pela cobertura vegetal, o escoamento das águas que atingem a superfície do solo é lento, e parte dessa água fica interceptada pela cobertura florestal e serrapilheira. Tal condição foi verificada por Miyata et al. (2009), onde foram comparados os valores de erosão anual em parcelas com diferentes tratamentos, em que se constatou que em parcelas com o solo coberto por vegetação diminuíram-se as chances de desprendimento do solo por gotas de chuva em 95%. Restaurar cobertura florestal, sobretudo de zonas ribeirinhas, pode reduzir a fragilidade ambiental (Oliveira-Andreoli et al., 2021).

Dessa forma, evidencia-se que os estudos de fragilidade ambiental no Brasil, sobretudo que utilizem a base de dados de cobertura e uso do solo do Projeto MapBiomas (MapBiomas, 2020), proporcionam melhor definição das diretrizes e ações a serem implantadas no espaço físico-territorial, servindo de base para o zoneamento ambiental e fornecendo subsídios à gestão do território (Spörl e Ross, 2004; Anjinho et al., 2021). As atividades humanas são a principal fonte de modificação da superfície da terra (Becker et al., 2021), demonstrando que a utilização de dados de cobertura e uso do solo de fontes oficiais do país, de alta precisão, acesso aberto e em constante evolução, como é o caso do MapBiomas, eleva a confiabilidade do mapeamento da fragilidade ambiental do tipo emergente. Além

disso, são importantes ferramentas para avaliações ambientais estratégicas, especialmente em casos de intervenções antrópicas, assim como na definição de áreas prioritárias à conservação ambiental, além de Unidades de Conservação (Campos et al., 2019; Menezes et al., 2019).

A partir da análise conjunta dos fatores considerados determinantes no mapeamento da FAP e FAE neste estudo, foi possível perceber a interação que há entre os fatores utilizados como indicadores na determinação da fragilidade inerente à BHRJ. Todavia, é importante considerar que a BHRJ é muito heterogênea (Figura 6), composta por subterritórios distintos que requerem atenção diferenciada, seja por estarem localizados em terrenos com maior declividade (França et al. 2018), seja por integrarem áreas constituídas de solos mais susceptíveis à erosão, por possuírem menor disponibilidade hídrica, por apresentarem particularidades socioculturais ou a combinação de vários fatores (Ferreira; Saadi, 2011).

Uma caracterização da paisagem ao longo da BHRJ é apresentada na Figura 6, com destaque a constatação da heterogeneidade da fisionomia da paisagem ao longo de toda a bacia hidrográfica. Em (a), (b) e (c) uma demonstração da porção com maior FAP e FAE na BHRJ, notadamente as zonas conhecidas como campos rupestres (alto rio Jequitinhonha); (d), (e) e (f) áreas com plantações comerciais de eucalipto (entre médio e alto rio Jequitinhonha); (g) área declivosa com uso e ocupação antrópico da terra; (h) sítio declivoso com problemas relacionados à erosão do solo; (i) atividade pecuária local; (j) e (k), (l) e (m) zona semiárida da bacia com intenso uso antrópico; (n), (o) e (p) áreas declivosas sem cobertura vegetal; (q) e (r) atividade de mineração e; (s) e (t) áreas no baixo rio Jequitinhonha, com maior influência florestal tropical, notadamente zonas observadas nos mapas finais de FAP e FAE com menores taxas de fragilidade.





**Figura 6.** Registro fotográfico com a caracterização da paisagem ao longo da extensão da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, Brasil (Fonte: os autores, 2020).

## **AVALIAÇÃO DO MÉTODO: AVANÇOS E DESAFIOS**

Adotamos nesse estudo uma abordagem ecodinâmica empírica que combinou avaliação de fragilidade ambiental com métodos de SIG e modelo de tomada de decisão AHP para mapear a fragilidade ambiental da BHRJ. Identificamos zonas de maior e menor prioridade para proteção e conservação ambiental. O aporte metodológico utilizado é eficiente para o zoneamento ambiental e planejamento do uso da terra, sobretudo em escala de bacias hidrográficas. É importante ainda ressaltar que, quanto maior for a incorporação de novos fatores na metodologia de análise, desde que eles estejam relacionados com a determinação da fragilidade ambiental, mais condizentes com a realidade local serão os resultados obtidos. Dessa forma, recomenda-se a avaliação e estudos sobre a incorporação de novos fatores à metodologia original, além daqueles apresentados neste estudo.

Para o Brasil, os estudos de fragilidade ambiental podem ser amplamente explorados e realizados por pesquisadores e gestores públicos, em virtude principalmente, da disponibilidade gratuita de dados de cobertura e uso do solo para o país desenvolvidos pelo Projeto MapBiomias (MapBiomias, 2020), que, de acordo com a escala de análise a ser trabalhada, reduz tempo e dispensa custos em aquisição e processamentos de imagens de satélite por parte dos analistas de fragilidade ambiental. Esta condição é um avanço do Brasil em relação às outras regiões do mundo além de um fator de diferenciação para os mais recentes estudos de fragilidade ambiental.

Um dos principais desafios da análise de fragilidade ambiental é a atribuição de pesos com base em conhecimentos técnicos e científicos específicos. Estudos sobre o desenvolvimento e técnicas de validação de índices de fragilidade ambiental ainda são necessários (Wang et al., 2008; Xiaodan et al., 2010; Macedo et al., 2018), especialmente ensaios em larga escala sobre a probabilidade real de erosão dos solos e sedimentações (Panagos et al., 2014; 2015). Além disso, estudos que auxiliem na redução do viés arbitrário na tomada de decisão também são requeridos, tal como a aplicação de técnicas de aprendizado de máquinas para estimar os pesos nas ponderações dos parâmetros, como observado em alguns estudos de AMC (Lu et al., 2012; Zhou et al., 2016; Rodríguez-Merino et al., 2020).

Por outro lado, a definição de pesos embasada em outros estudos já publicados na literatura, o conhecimento técnico de especialistas e o auxílio do modelo AHP utilizado neste estudo, trata-se de um grande avanço em relação às análises multicritério convencionais em SIG. O AHP quantifica matematicamente avaliações empíricas (Beiragh et al., 2020; França et al., 2020b). Além disso, o processo de estabelecimento de pesos por especialistas de forma participativa é importante porque representa a compreensão precisa das características críticas da paisagem. Por essa razão a AMC combinada ao AHP tem sido amplamente utilizada (Randhir; Shriver, 2009; Mello et al., 2020; Morandi et al., 2020). AMC é uma ferramenta de modelagem promissora para apoio à decisão a fim de definir áreas prioritárias para a gestão de bacias hidrográficas (Mello et al., 2020) e se mostrou eficiente para caracterizar as áreas que necessitam de maior atenção quanto à fragilidade ambiental na BHRJ.

Embora o modelo pensado no estudo não incorpore diretamente a “fração social”, algum indicador relacionado à sustentabilidade social (Rose et al., 2021) também pode auxiliar na melhoria da compreensão e assertividade de análises em fragilidade ambiental sob perspectivas sociais, como por exemplo em estudos de caso de territórios municipais (França et al., 2019; França et al., 2020a) Recomendamos que estudos futuros sejam desenvolvidos levando em consideração um componente social nas análises de zoneamento na escala de bacia hidrográfica.

A metodologia utilizada pode ser replicada para qualquer outra região global, por permitir a flexibilidade de uso e classificação de fatores específicos para o ambiente e padrões morfodinâmicos de cada região à qual se aplica. Esta adaptabilidade não altera o conceito fundamental do método e fornece análises mais representativas de diversos ambientes (Anjinho et al., 2021).

## RECOMENDAÇÕES PARA A GESTÃO AMBIENTAL

Por fim, no contexto do zoneamento da fragilidade ambiental da BHRJ, propomos algumas práticas conservacionistas e de uso da terra mais adequadas para garantir a condições de conservação ambiental e o desenvolvimento socioeconômico (Tabela 7), conforme recomendações observadas em Lal (1997), Manfré et al. (2013), Castro et al. (2015), Cruz et al. (2017) e Anjinho et al. (2021). O uso e manejo da terra influenciam a magnitude da perda de solo (Panagos et al., 2015) e degradação ambiental.

O desenvolvimento de atividades antrópicas em áreas de elevada fragilidade ambiental pode intensificar processos de degradação do solo e afetar a qualidade dos recursos hídricos e do macroecossistema local (Anjinho et al., 2021). Desta forma, essas áreas devem ser priorizadas para a implantação de práticas conservacionistas do uso do solo, como forma de garantir a adequação do uso antrópico atual e projetar ações de restauração de áreas já em estágio de degradação. Para as classes mais baixas de fragilidade ambiental o uso antrópico da terra é adequado. Apesar disso, boas práticas de uso da terra e conservação da vegetação natural são recomendadas, principalmente para os sítios classificados a partir da categoria *média* fragilidade.

**Tabela 7.** Graus de fragilidade ambiental, cenários de potencial degradação e recomendações/propostas de conservação, recuperação e uso sustentável da terra.

| EEF             | (A)   | (B)                      |   |
|-----------------|---|--------------------------|---|
|                 | Risco de Degradação   | Resiliência              |   |
|                 | Susceptibilidade à degradação   | Descrição                | Recomendações   |
| Baixa           | <i>Resistente</i><br>(Muito resistente ao estresse e estável)                       | Altamente resiliente     | (1) Apto para uso antrópico da terra.   |
|                 |   |                          | (2) Áreas de rápida recuperação/regeneração.  |
|                 |   |                          | (3) Conservação de remanescentes vegetais/florestais existentes.  |
| Levemente Baixa | <i>Ligeira</i><br>(Resistente ao estresse e estável)                                | Resiliente               | (1) Apto para uso antrópico da terra.   |
|                 |   |                          | (2) Técnicas convencionais de recuperação com manejo apropriado.  |
|                 |   |                          | (3) Conservação de remanescentes vegetais/florestais existentes.  |
| Média           | <i>Moderada</i><br>(Suscetível ao estresse, com transição de estável para instável) | Moderadamente resiliente | (1) Requer atenção quanto ao uso antrópico da terra; preferencialmente cultivo mínimo agrícola e silvicultural. |
|                 |   |                          | (2) Manejo correto de pastagens.  |

| EEF               | (A)  | (B)                               |   |
|-------------------|--|-----------------------------------|---|
|                   | Risco de Degradação  | Resiliência                       |   |
|                   | Susceptibilidade à degradação                                | Descrição                         | Recomendações   |
|                   |  |                                   | (4) Recuperação por meio de técnicas e indução da regeneração natural.  |
| Alta              | <i>Alta</i><br>(Altamente suscetível ao estresse e instável) | Ligeiramente ou baixa resiliência | (1) Prioridade para conservação e/ou restauração.   |
|                   |  |                                   | (2) Reflorestamento com espécies nativas e cercamento de margens em córregos e entornos de nascentes antropizadas.    |
|                   |  |                                   | (3) Lentamente recuperável, mesmo com mudança no uso do solo.   |
|                   |  |                                   | (4) Uso de práticas conservacionistas em atividades antrópicas de uso da terra.                                       |
| Extremamente Alta | Extrema<br>Extremamente suscetível e frágil                  | Baixa ou nenhuma resiliência      | (1) Áreas destinadas à conservação e proteção da vegetação natural.   |
|                   |  |                                   | (2) Efetiva recuperação pouco provável, mesmo com mudança no uso do solo.   |
|                   |  |                                   | (3) Cumprimento Código Florestal para APPs <sup>1</sup> de declividades, topo de morros, margens de rios e nascentes. |
|                   |  |                                   | (4) Prioritárias para implementação de Unidades de Conservação.   |

<sup>1</sup>APPs: Áreas de Preservação Permanente (BRASIL, 2012).

Estas recomendações de uso da terra e conservação ambiental são indicadas sob uma visão regional e, cada conjuntura nas instâncias reais requer atenção específica. Nilsson e Grelsson (1995) destacam que a fragilidade é uma propriedade inerente de um ecossistema, ou seja, um ecossistema tem uma certa fragilidade estando ou não exposto a quaisquer perturbações. A única fragilidade efetivamente observável é aquela exibida como resultado de perturbações, tanto naturais quanto humanas operando no ecossistema. Portanto, relacionar os ecossistemas às perturbações e ações antrópicas que neles atuam pode fornecer avaliações úteis e fundamentais na concepção de um zoneamento ambiental. Essa abordagem está intimamente relacionada à avaliação de impactos ambientais.

Algumas indicações finais deste estudo são importantes para o melhor entendimento do manejo adequado do uso do solo em relação às condições de fragilidade ambiental. São necessários: (i) Considerar a utilização das classes de fragilidade ambiental como unidade de planejamento da paisagem para conservação e produção econômica; (ii) Empregar banco de dados oficiais e públicos, tal como a base de

cobertura e uso do solo da plataforma brasileira MapBiomas é imprescindível para a geração do mapeamento da fragilidade ambiental emergente mais confiável para nortear ações de inteligência geográfica e ordenamento ambiental e territorial; (iii) Maior atenção quanto ao cumprimento das legislações vigentes para proteção efetiva dos ecossistemas mais frágeis; (iv) Promover práticas de manejo que considerem as compensações e sinergias entre os múltiplos serviços ecossistêmicos; (v) Incentivar práticas agrícolas, como diversidade e rotação de culturas e sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta; (vi) Criar políticas e programas específicos para controlar a degradação da terra e a perda de biodiversidade em sítios de alta fragilidade e; (viii) Apoiar o planejamento da paisagem local a regional considerando as práticas sustentáveis e a participação de tomadores de decisão e *stakeholders*.

## Conclusões e Perspectivas

---

Modelos espaciais de fragilidade ambiental são produtos fundamentais para o entendimento da susceptibilidade dos solos, com e sem a intervenção antrópica. Os mapas de FAP e FAE gerados neste estudo podem ser utilizados como ferramentas de inteligência territorial e ambiental para região de estudo;

O arcabouço metodológico utilizado neste estudo determinou de forma eficiente a caracterização da fragilidade ambiental da BHRJ e pode ser replicado para outras ecorregiões do mundo de acordo com suas características específicas e padrões morfodinâmicos. A integração dos métodos implementados neste estudo é de fácil replicação e baixo custo econômico;

A metodologia do estudo poderá apoiar agências governamentais nos processos de tomada de decisão para o gerenciamento do uso da terra e dos serviços ambientais, além de permitir uma priorização de áreas para conservação ou restauração, portanto, subsidiando um adequado zoneamento ambiental em bacias hidrográficas;

A área de estudo apresenta um mosaico de ecossistemas com espécies vegetais endêmicas e algumas ameaçadas de extinção e, é uma zona considerada *hotspot* mundial para a conservação da biodiversidade. Nossos resultados podem auxiliar na compreensão das práticas de priorização de áreas para proteção integral dentro da BHRJ.

## Agradecimentos

---

O primeiro autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 - por conceder a bolsa de pesquisa à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) pelo período em que o estudo foi desenvolvido, e a Universidade do Porto (Faculdade de Ciências) pela oportunidade de realização de período sanduíche. Agradece ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da UFVJM. Agradecemos às instituições brasileiras (FEAM, CPRM e MapBiomas) e internacionais (USGS) pela concepção pública e gratuita dos dados utilizados neste estudo. Agradecimentos especiais ao Prof. Dr. Marcelino Santos de Moraes (Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil), Prof. Dr. Allaoua Saadi (Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil), Prof. Dr. Israel Marinho Pereira (Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil), Prof. Dr. Carlos Valdir de Meneses Bateira (Universidade do Porto, Portugal) e Dr. João José Honrado Pradinho (Universidade do Porto, Portugal) pela contribuição científica em determinadas etapas deste estudo.

## Referências Bibliográficas

---

- Albaladejo J et al. (2021). Eco-Holistic Soil Conservation to support Land Degradation Neutrality and the Sustainable Development Goals. *CATENA*, 196, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104823>
- Alvares CA et al. (2013). Köppen's Climate Classification Map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6): 711-728, <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Alves WS et al. (2017). Analysis of the environmental fragility of the river basin of Ribeirão das Abóboras, in Rio Verde, South-West of Goiás State. *Geofocus*, 19: 81-108. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.556>
- Amaral e Silva A et al. (2020). Anthropic activities and the Legal Amazon: Estimative of impacts on forest and regional climate for 2030. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100304>
- Amaral FCS et al. (2004). Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 63: 95p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/965988>. Acesso em: 11/10/2020.
- Anjinho OS et al. (2021). Environmental fragility analysis in reservoir drainage basin land use planning: A Brazilian basin case study. *Land Use Policy*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104946>
- Baude M et al. (2019). Land use change in an agricultural landscape causing degradation of soil-based ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 659: 1526-1536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.455>
- Becker WR et al. (2021). Statistical features for land use and land cover classifications in Google Earth Engine. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100459>
- Beiragh RG et al. (2020). An integrated Multi-Criteria Decision-Making Model for Sustainability Performance Assessment for Insurance Companies. *Sustainability*, 12. <http://dx.doi.org/10.3390/su12030789>
- Benites VM et al. (2007). Soils associated with rock outcrops in the Brazilian mountain ranges Mantiqueira and Espinhaço. *Revista Brasileira Botânica*, 3: 569-577. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-84042007000400003>
- Borges MG et al. (2018). Using Modis Sensoring to Map Eucalyptus Production in the State of Minas Gerais. *Espaço Aberto*, 8(1): 53-70. <https://doi.org/10.36403/espacoaberto.2018.14364>



- BRASIL (2012). Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis no 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis no 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato20112014/2012/lei/L12651compilado.html](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20112014/2012/lei/L12651compilado.html). Acesso em: 08/12/2019.
- BRASIL (2017). Ministério do Meio Ambiente, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério da Educação. Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa, Brasília, DF: MMA. 73p. Disponível em: [http://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/planaveg\\_publicacao.pdf](http://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/planaveg_publicacao.pdf). Acesso em: 11/10/2020.
- Câmara G et al (1996). SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics*, 20(3): 395-403. [https://doi.org/10.1016/0097-8493\(96\)00008-8](https://doi.org/10.1016/0097-8493(96)00008-8)
- Campos JÁ et al. (2019). Environmental fragility and vegetation cover dynamics in the Lapa Grande State Park, MG, Brazil. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 91(2). <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201920170940>
- Carvalho CCN et al. (2015). Soil Surveys in Brazil and Perspectives in Soil Digital Mapping. *Soil Horizons*, 56(6): 1-9. <https://doi.org/10.2136/sh14-01-0002>
- Castro SS, Hernani LC (2015). Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade. Brasília, DF: Embrapa, 367p.
- Chappell A et al. (2019). Minimising soil organic carbon erosion by wind is critical for land degradation neutrality. *Environmental Science and Policy*, 93: 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.020>
- Christofoletti A (1980). Geomorfologia. São Paulo: Edgard Blücher.
- COP 21 - 21<sup>st</sup>(2015). Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Disponível em: <https://s3.sa-east-1.amazonaws.com/cop25.cl/documents/esp/ACUERDO%20DE%20PARIS.pdf>. Acesso em: 11/10/2020.
- COP 25 - 25<sup>st</sup> (2019). Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Disponível em: <https://www.cop25.cl/#/>. Acesso em: 11/10/2020.
- Costa LC et al. (2021). New approach for drought assessment: A case study in the northern region of Minas Gerais. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.102019>

- Couto Júnior A et al. (2021). Data for: Terrain units, land use/cover, and gross primary productivity of the largest fluvial basin in the Brazilian Amazonia/Cerrado ecotone: The Araguaia River Basin. *Data in Brief*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106636>
- CPRM (2013). Serviço Geológico do Brasil. Atlas pluviométrico do Brasil. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>. Acesso em: 10/08/2019.
- Crepani E et al. (2001). Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 124p.
- Cruz BB et al. (2017). Environmental fragility framework for water supply systems: a case study in the Paulista Macro Metropolis area (SE Brazil). *Environ. Earth Sci.*, 76: 2-13, <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6778-3>
- Deodoro SC, Fonseca BM (2016). Análise morfométrica e multicriterial da bacia hidrográfica do Rio Santa Bárbara, Nordeste do Quadrilátero Ferrífero (MG). *Revista Brasileira de Cartografia*, 68(9): 1837-1852. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/download/44449/23524/>. Acesso em: 11/10/2020.
- Derakhshan-Babaei F et al. (2020). Relating the spatial variability of chemical weathering and erosion to geological and topographical zones. *Geomorphology*, 363(15). <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107235>
- Eastman JR (2006). Decision Support: Decision Strategy Analysis. In: Clark University (Ed.). *IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing*. Worcester: Clark Labs.
- EMBRAPA (2011). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada. Rio de Janeiro: IBGE/ Embrapa Solos, 67p.
- EMBRAPA (2017). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Agência Embrapa de Informação Tecnológica.: Solos Tropicais/Argissolos. Disponível em: [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos\\_tropicais/arvore/CONTAG01\\_7\\_2212200611538.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_7_2212200611538.html). Acesso em 21/08/2019.
- ESRI (2013). Environmental Systems Research Institute. ArcGIS 10.0: GIS by ESRI. ESRI.
- Fendrich et al. (2020). Disclosing contrasting scenarios for future land cover in Brazil: Results from a high-resolution spatiotemporal model. *Science of the Total Environment*, 742. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140477>
- Ferreira VO (2007). Paisagem, recursos hídricos e desenvolvimento econômico na Bacia do Rio Jequitinhonha, em Minas Gerais. 313p. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de

- Minas Gerais (UFMG). Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MPBB-78RN42>. Acesso em: 11/10/2020.
- Ferreira VO (2011). Unidades de Paisagem da bacia do Rio Jequitinhonha, em Minas Gerais, subsídios para a gestão de recursos hídricos. *Caminhos de Geografia*, 12(37): 239-257. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/16456/9194>
- Ferreira VO, Saadi A (2011) Disponibilidade hídrica e subdesenvolvimento socioeconômico em Unidades de Paisagem da Bacia do Rio Jequitinhonha, em Minas Gerais. *Caminhos de Geografia*, 12(40): 166-180. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/download/16651/9247/>. Acesso em: 11/11/2020.
- Ferreira VO, Silva MM (2012). O Clima da Bacia do Rio Jequitinhonha, em Minas Gerais: Subsídios para a Gestão de Recursos Hídricos. *Revista Brasileira de Geografia Física*. 2: 303-319. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v5.2.p302-319>
- Ferreira VOF, Saadi A (2013). Paisagens Culturais da Bacia do Rio Jequitinhonha, em Minas Gerais. *Observatorium*, 5(14): 2-26. Disponível em: <http://www.observatorium.ig.ufu.br/pdfs/5edicao/n14/01.pdf>. Acesso em: 11/10/2019.
- França LCJ (2018). Environmental Fragility Potential of the river Jequitinhonha basin, Minas Gerais, Brazil. (Masters dissertation). Disponível em: <http://acervo.ufvjm.edu.br/jspui/handle/1/1585>. Acesso em: 11/10/2020
- França LCJ et al. (2018). Delimitação automática e quantificação das Áreas de Preservação Permanente de encosta para o município de Diamantina, Minas Gerais, Brasil. *Revista Espinhaço*, 7(2): 60-71. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3952853>
- França LCJ et al. (2019). Zoneamento da fragilidade ambiental de ecossistemas naturais e antropizados por meio de avaliação multicritério. *Nativa*, 7(5): 589-599. <https://doi.org/10.31413/nativa.v7i5.7300>
- França LCJ et al. (2020a). Modelagem da fragilidade ambiental potencial de Almenara, Minas Gerais. *Recital - Revista De Educação, Ciência E Tecnologia De Almenara/MG*, 2(1): 37-59. <https://doi.org/10.46636/recital.v2i1.64>
- França LCJ et al. (2020b). AHP approach applied to multi-criteria decisions in environmental fragility mapping. *FLORESTA*, 50(3): 1623-1632. <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v50i3.65146>
- Fushita AT et al. (2011). Fragilidade Ambiental Associada ao Risco Potencial de Erosão de Uma Área da Região Geoeconômica Médio Mogi Guaçu Superior (SP), *Revista Brasileira de Cartografia*, 63(4): 477-488. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/49216>. Acesso em: 11/10/2021.

- Garcia QS et al. (2020). Environmental factors driving seed dormancy and germination in tropical ecosystems: A perspective from campo rupestre species. *Environmental and Experimental Botany*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104164>
- Giamalaki M, Tsoutsos T (2019). Sustainable siting of solar power installations in Mediterranean using a GIS/AHP approach. *Renewable Energy*, 141: 64-75. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.100>
- Godard V et al. (2010). Spatial distribution of denudation in Eastern Tibet and regressive erosion of plateau margins. *Tectonophysics*, 491: 253-274. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.10.026>
- Gonçalves SRA et al. (2016). Mapeamento do Grau de Fragilidade com Processo Analítico Hierárquico e operadores Fuzzy Gama na detecção de áreas de fragilidade ambiental. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68(2): 327-337. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44398>. Acesso em: 11/10/2020.
- Hernandes TAD et al. (2021). O. Identifying suitable areas for expanding sugarcane ethanol production in Brazil under conservation of environmentally relevant habitats. *Journal of Cleaner Production*, article in press. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125318>
- IBÁ (2020). *Industria Brasileira de Árvores. Relatório IBÁ 2020 (Ano base 2019)*. São Paulo. Disponível em: < <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>>. Acesso em: 09/10/2020.
- Júnior AC, Rohm AS (2014). Analysis of environmental fragility using multi-criteria analysis (MCE) for integrated landscape assessment. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 8: 28-37. <https://doi.org/10.4090/juee.2014.v8n1.028037>
- Karfunkel J et al. (1994). Diamonds from Minas Gerais, Brazil: An Update on Sources, Origin, and Production. *International Geology Review*, 36: 1019-1032. <https://doi.org/10.1080/00206819409465502>
- Kidane M et al. (2019). The impact of land use and land cover (LULC) dynamics on soil erosion and sediment yield in Ethiopia. *Heliyon*, 5(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02981>
- Lage MR et al. (2021). Caracterização do substrato de áreas degradadas pela extração de cascalho. *Espacios*, 38(46): 8p. Disponível em: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24553819800>. Acesso em: 11/10/2021.
- Lal R (1997). Degradation and resilience of soils. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 352: 997-1010. <https://dx.doi.org/10.1098%2Frstb.1997.0078>
- Li Z et al. (2021). Detecting land degradation in Southern Africa using Time Series Segment and Residual Trend (TSS-RESTREND). *Journal of Arid Environments*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104314>

- Liu S, Li W (2019). Zoning and management of phreatic water resource conservation impacted by underground coal mining: A case study in arid and semiarid areas. *Journal of Cleaner Production*, 224: 677-685. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.282>
- Lopes FA et al. (2011). Viajantes e Naturalistas do século XIX: a reconstrução do antigo Distrito Diamantino na Literatura de Viagem. *Caderno de Geografia*, 21(36): 66-86. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=333227272005>. Acesso em: 11/10/2021.
- Lopes FA et al. (2016). Análise da influência litológica e estrutural a partir de métodos morfométricos em segmentos de drenagem na porção cimeira da Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha, MG. *Caminhos de Geografia*, 17(58): 136-153. <https://doi.org/10.14393/RCG175810>
- Lowe MA et al. (2021). The impact of Soil Water Repellency and Slope upon Runoff and Erosion. *Soil and Tillage Research*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104756>
- Lu CY et al. (2012). Assessing habitat suitability based on geographic information system (GIS) and fuzzy: A case study of *Schisandra sphenanthera* Rehd. Et Wils. In *Qinling Mountains, China. Ecological Modelling*, 242: 105-115. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.06.002>
- Magalhães IB et al. (2020). Brazilian Cerrado and Soy moratorium: Effects on biome preservation and consequences on grain production. *Land Use Policy*, 99. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105030>
- Manfré LA et al. (2013). Environmental fragility evaluation and guidelines for environmental zoning: a study case on Ibuina (the Southeastern Brazilian region). *Environmental Earth Sciences*, 69: 947-957. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1979-2>
- MapBiomas (2020). Coleção 4.1 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso do Solo do Brasil. Acesso em 10/05/2020. Disponível em: <https://plataforma.mapbiomas.org/map#coverage>. Acesso em: 11/03/2020.
- Martinelli G, Moraes MA (2013). Livro Vermelho da flora do Brasil. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 1100p. Disponível em: <http://dspace.jbrj.gov.br/jspui/handle/doc/26>>. Acesso em: 10/10/2019.
- Mekuria W et al. (2018). Restoration of degraded landscapes for ecosystem services in North-Western Ethiopia. *Heliyon*, 4(8): 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00764>
- Mello K et al. (2020). Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110879>
- Menezes ES et al. (2019). Análise Temporal de focos de calor na Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço. *Nativa*, 7(3): 256-261. <https://doi.org/10.31413/nativa.v7i3.6877>
- Miara MA, Oka-Fiori C (2007). Análise por múltiplos indicadores para a definição de níveis de fragilidade ambiental – um estudo de caso: bacia hidrográfica do rio Cará-Cará, Ponta Grossa/PR. *RA'EGA*, 13: 85-98. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v13i0.6642>

- Miyata S et al. (2009). Effects of forest floor coverage on overland flow and soil erosion on hillslopes in Japanese cypress plantation forests. *Water Resources Research*, 45(6): 1-17. <https://doi.org/10.1029/2008WR007270>
- Morandi DT et al. (2018). Diagnóstico da antropização em área de preservação permanente em segmento do rio Jequitinhonha (MG). *Biofix Scientific Journal*, 3(2): 252-259. <http://dx.doi.org/10.5380/biofix.v3i2.60177>
- Morandi DT et al. (2020). Delimitation of ecological corridors between conservation units in the Brazilian Cerrado using a GIS and AHP approach. *Ecological Indicators*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106440>
- Morellato LP, Silveira FA (2018). O. Plant life in campo rupestre: News lessons from an ancient biodiversity hotspot. *Flora*, 238: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2017.12.001>
- Mota PHS et al. (2019). Forest fire hazard zoning in Mato Grosso State, Brazil. *Land Use Policy*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104206>
- Mucida DP et al. (2019). Environmental degradation in narratives of naturalists of the 19<sup>th</sup> century for the Espinhaço Range Biosphere Reserve. *Caderno de Geografia*, 29(57). <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2019v29n57p465-495>
- Mucina L (2018). Vegetation of Brazilian campos rupestres on siliceous substrates and their global analogues. *Flora*, 238: 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2017.06.007>
- Nilson C, Grelsson G (1995). The Fragility of Ecosystems: A Review. *The Journal of Applied Ecology*, 32(4): 677-692. <https://doi.org/10.2307/2404808>
- Nkonya EJ et al. (2016). Economics of Land Degradation in Sub-Saharan Africa. In: In: Nkonya E, Mirzabaev A, von Braun J (eds) *Economics of Land Degradation and Improvement – A Global Assessment for Sustainable Development*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-19168-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19168-3_9)
- Nzeyimana AE, Hartemink VG (2014). GIS-based multi-criteria analysis for arabica coffee expansion in Rwanda. *PLoS ONE*, 9: e107449. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149239>
- Oliveira PTS et al. (2009). Processo Analítico Hierárquico aplicado a vulnerabilidade natural a erosão. *Geociências*, 28(4): 417-424. Available in: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/7086/6531>. Acesso em: 11/10/2020.
- Oliveira-Andreoli et al. (2021). Multi-temporal analysis of land use land cover interference in environmental fragility in a Mesozoic basin, southeastern Brazil. *Groundwater for Sustainable Development*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100536>.
- Panagos P et al. (2014). Seasonal monitoring of soil erosion at regional scale: An application of the G2 model in Crete focusing on agricultural land uses. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 27: 147-155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2013.09.012>

- Panagos P et al. (2015). Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*, 48: 38-50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
- Pereira HM et al. (2010). Scenarios for Global Biodiversity in the 21<sup>st</sup> Century. *Science*, 330: 1496-1501. <https://doi.org/10.1371/10.1126/science.1196624>
- Právělie R (2018). Major perturbations in the Earth's forest ecosystems. Possible implications for global warming. *Earth-Science Reviews*, 185: 544-571. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.010>
- Quartaroli CF et al. (2013). Carta de vulnerabilidade natural à perda de solo do Estado do Maranhão. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. 44p.
- Randhir T, Shriver DM (2009). Deliberative valuation without prices: a multiattribute prioritization for watershed ecosystem management. *Ecological Economics*, 68(12): 3042-3051. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.07.008>
- Rapini A et al. (2008). A flora dos campos rupestres da Cadeira do Espinhaço. *Megadiversidade*, 4(1-2). Disponível em: [http://www.inot.org.br/artigo/Rapini\\_et\\_al\\_2008\\_A\\_flora\\_dos\\_campos\\_rupestres\\_da\\_Cadeira\\_do\\_Espinhaco.pdf](http://www.inot.org.br/artigo/Rapini_et_al_2008_A_flora_dos_campos_rupestres_da_Cadeira_do_Espinhaco.pdf). Acesso em: 11/10/2019.
- Ribeiro KT, Freitas L (2010). Potential impacts of changes to Brazilian Forest Code in campos rupestres and campos de altitude. *Biota Neotropica*, 10(4). Disponível em: <https://www.biotaneotropica.org.br/v10n4/en/>. Acesso em: 11/10/2020.
- Rodríguez-Merino A et al. (2020). Combining multicriteria decision analysis and GIS to assess vulnerability within a protected area: An objective methodology for managing complex and fragile systems. *Ecological Indicators*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105738>
- Rose DC et al. (2021). Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and the 'planet. *Land Use Policy*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104933>
- Ross JLS (1994). Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizado. *Revista do Departamento de Geografia, São Paulo - SP*, 8: 24-30. <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>
- Ross JLS (2012). Landforms and environmental planning: Potentialities and Fragilities. *Revista do Departamento de Geografia*, esp.: 38-51. <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0112.0003>
- Saaty TL (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw Hill International, New York.
- Saaty TL (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48: 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Saaty TL (1991). Some mathematical concepts of the Analytic Hierarchy Process. *Behaviormetrika*, 18(29): 1–9. [https://doi.org/10.2333/bhmk.18.29\\_1](https://doi.org/10.2333/bhmk.18.29_1)
- Saaty, T. L. (2003). Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. *European journal of operational research*, 145(1), 85-91.

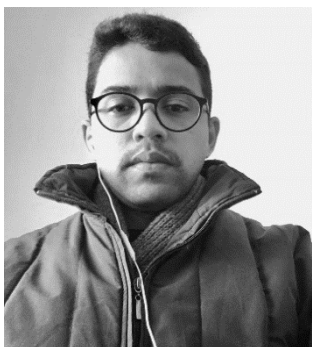
- Saaty TS (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1). Disponível em: <http://www.rafikulislam.com/uploads/resourses/197245512559a37aadea6d.pdf>. Acesso em: 11/03/2019.
- Sallun AEM et al. (2008). Diagnóstico do meio físico da bacia hidrográfica do Rio Congonhas, MG. *Geonomos*, 16(1): 37-50. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v16i1.92>
- Santos JD et al. (2020). Do século XIX ao XXI: estudo comparativo da vegetação primitiva pelo olhar de Saint-Hilaire e fitofisionomias atuais. *Finisterra*, 55(113): 117–134. <https://doi.org/10.18055/Finis17881>
- Scarano FR, Ceotto P (2015). Brazilian Atlantic forest: impact, vulnerability, and adaptation to climate change. *Biodivers Conserv*, 24: 2319-2331. <https://doi.org/10.1007/s10531-015-0972-y>
- Schaefer CE et al. (2016). The Physical Environment of Rupestrian Grasslands (Campos Rupestres) in Brazil: Geological, Geomorphological and Pedological Characteristics, and Interplays. In: Fernandes G. (eds) *Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-29808-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29808-5_2)
- Schimidt IB, Eloy L (2020). Fire regime in the Brazilian Savanna: Recent changes, policy and management. *Flora*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151613>
- Schimidt MAR, Barbosa GR (2016). Uso de redes neurais artificiais na ponderação inicial da técnica AHP em análises de vulnerabilidade de bacias hidrográficas. *Bol. Ciênc. Geod.*, 22(3): 511-525. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702016000300029>
- Segan DB et al. (2016). A global assessment of current and future biodiversity vulnerability to habitat loss-climate change interactions. *Global Ecology and Conservation*. 5: 12-21. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.11.002>
- Silva WG et al. (2016). Susceptibilidade a erosão utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica. *Cerrado Agrociências*, 7: 66-78.
- Silveira LP et al. (2018). Evaluation of different methods to control invasive alien grass weeds in a degraded area. *African Journal of Agricultural Research*, 13(32): 1655-1660. <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13276>
- Slocum RB et al (2008). *Howard Thematic cartography and geographic visualization* (3rd ed.), Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Souza Jr CM et al. (2020). Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sensing*, 12(17). <http://dx.doi.org/10.3390/rs12172735>
- Sporl C, Ross JLS (2004). Análise comparativa da Fragilidade Ambiental com Aplicação de Três Modelos. *GEOUSP - Espaço e Tempo*. 15: 39-49. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2004.123868>





- Strahler NA (1952). Hypsometric analysis of erosional topography. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 63: 111-1141.
- Strassburg BBN et al. (2020). Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*, 2-24.  
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2784-9>
- Streck EV et al. (2002). Solos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: EMATER/RS; UFRGS.
- Svisero DP (1995). Distribution and origin of diamonds in Brazil: An overview. *Journal of Geodynamics*, 20(4): 493-514. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(95\)00017-4](https://doi.org/10.1016/0264-3707(95)00017-4)
- Tesfahunegn GB (2019). Farmer's perception on land degradation in northern Ethiopia: Implication for developing sustainable land management. *The Social Science Journal*, 56: 268-287.  
<https://doi.org/10.1016/j.soscij.2018.07.004>
- Tricart J (1977). *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: FIBGE, Secretaria de Planejamento da Presidência da República.
- Trigueiro WR et al. (2020). Uncovering the spatial variability of recent deforestation drives in the Brazilian Cerrado. *Journal of Environmental Management*, 275.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111243>
- Tucker GE, Hancock GR (2010). Modelling landscape evolution. *Earth Surface Process and Landforms*, Switzerland, 35: 28-50. <https://doi.org/10.1002/esp.1952>
- UFV - CETEC - UFLA – FEAM (2010). Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 49p. Disponível em: <http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>. Acesso em: 27/10/2018.
- UNCCD (2014). Land-based Adaptation and Resilience. Powered by Nature. United Nations Convention to Combat Desertification. Disponível em: [http://www.eld-initiative.org/fileadmin/pdf/Land\\_Based\\_Adaptation\\_ENG\\_Sall\\_web.pdf](http://www.eld-initiative.org/fileadmin/pdf/Land_Based_Adaptation_ENG_Sall_web.pdf). Acesso em: 27/10/2020.
- USDA (2014). Natural Resources Conservation Service Soils. Keys to Soil Taxonomy. Washington, DC. Disponível em: [https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/class/taxonomy/?cid=nrcs142p2\\_053580](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/class/taxonomy/?cid=nrcs142p2_053580). Acesso em: 27/10/2018.
- Vitte AC, Vilela Filho LR (2006). A urbanização, a fragilidade potencial do relevo e a produção do risco na bacia hidrográfica do Córrego Proença, município de Campinas, Brasil. *Territorium*, 13: 105-114. [https://doi.org/10.14195/1647-7723\\_13\\_9](https://doi.org/10.14195/1647-7723_13_9)
- Voogd H (1983). *Multicriteria evaluation for urban and regional planning*. London, Pion, 370p. Disponível em: <https://pure.tue.nl/ws/files/3744610/102252.pdf>. Acesso em: 27/10/2020.
- Wang XD et al. (2008). Regional assessment of environmental vulnerability in the Tibetan Plateau: Development and application of a new method. *Journal of Arid Environments*, 72: 1929-1939.  
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.06.005>

- West TAP, Fearside PM (2021). Brazil's conservation reform and the reduction of deforestation in Amazonia. *Land Use Policy*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105072>
- Xiaodan W et al. (2010). A GIS-based decision support system for regional eco-security assessment and its application on the Tibetan Plateau. *Journal of Environmental Management*, 91: 1981-1990. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.05.006>
- Zambom N et al. (2021). Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall. *CATENA*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104827>
- Zhou X et al. (2016). Regionalization of Habitat Suitability of Masson's Pin based on geographic information system and Fuzzy Matter-Element Model. *Nature*, 6: 1-7. <https://dx.doi.org/10.1038%2Fsrep34716>



## Sobre os autores



  Graduação em Engenharia Florestal pela Universidade Federal do Piauí (UFPI) (2016). Mestre em Ciências Florestais pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) (2018), na área de Recursos Florestais, com ênfase em conservação e restauração de ecossistemas a partir de mapeamentos da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha em Minas Gerais. Tem experiência internacional, com intercâmbio realizado no Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Ambiente da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Portugal (2017). Atualmente é professor substituto do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico (Classe D), no Departamento de Engenharia e Computação (DEC) do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) - Campus Bambuí, Minas Gerais e, Doutorando em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Lavras (UFLA) com investigação nas áreas de planejamento florestal espacial e geotecnologias aplicadas à identificação de *tradeoffs* e sinergias existentes entre o uso e cobertura da terra e a otimização de projetos florestais para abastecimento de usinas termoeletricas baseadas em biomassa florestal no Brasil para geração de energia elétrica renovável. Tem ainda experiência nas seguintes áreas: manejo florestal, sistema de informações geográficas; otimização e planejamento florestal; geoprocessamento; manejo e ecologia de paisagens florestais. Luciano é idealizador do site Central Florestal, uma iniciativa de extensão sem fins lucrativos voltada à estudantes e profissionais de engenharia florestal. O site é dedicado ao fortalecimento da profissão, divulgação científica e difusão de temáticas e dados sobre o ensino, carreira e história da engenharia florestal no Brasil, podendo ser acessado em: [www.centralflorestal.com.br](http://www.centralflorestal.com.br) e nas principais redes sociais.

**E-mail:** [lucianocjfranca@gmail.com](mailto:lucianocjfranca@gmail.com)



  Graduação em Geologia pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) (1995), Mestrado em Geologia pela Universidade de Brasília (UNB) (1998) e Doutorado em Geologia pela Universidade de Brasília/Australian National University (2002). Realizou um estágio pós-doutoral pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) (2005) em Geocronologia e em 2016-2017 junto ao Programa de Pós-graduação em Geografia e Análise Ambiental do Instituto de Geociências da UFMG.

Atualmente é professora Associada III vinculada ao curso de Geografia-Licenciatura da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) e integra o Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Ciência Florestal (PPGCF-UFVJM). É coordenadora do Espaço GAIA - Geociências, Arte, Interdisciplinaridade e Aprendizagem - projeto de extensão continuado desde 2011, com enfoque em

divulgação científica e desenvolvimento de práticas lúdicas voltadas para o ensino aprendizagem. Danielle estuda através de SIG a espacialização e análise do estado de conservação e degradação ambiental de regiões/territórios, uso e cobertura do solo, métricas de paisagem, como suporte a políticas públicas de ordenamento territorial.

## Índice Remissivo

### A

AHP, 0, 1, 5, 6, 11, 12, 13, 17, 19, 23, 24, 28, 29, 38, 39, 41, 43  
*Analytic Hierarchy Process*, 0, 5, 42  
antropização, 25, 41  
áreas degradadas, 39

### B

bacias hidrográficas, 1, 2, 14, 28, 29, 33, 43

### C

Cobertura e uso do solo, 9  
Combinação Linear Ponderada, 0, 13

### D

degradação ambiental, 1, 2, 5, 6, 10, 23, 24, 25, 26, 30, 47

### E

ecologia de paisagens, 46  
ecossistemas, 0, 2, 4, 6, 23, 25, 31, 32, 33, 38, 46

### F

fragilidade ambiental, 1, 3, 0, 1, 2, 4, 5, 6, 10, 13, 14, 15, 18, 19, 20, 23, 24, 26, 28, 29, 30, 31, 33, 38, 39, 40, 46  
Fragilidade Ambiental Emergente, 4, 9, 21  
Fragilidade Ambiental Potencial, 4, 9, 17, 20, 21

### M

Minas Gerais, 1, 3, 1, 7, 8, 21, 24, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 44, 46  
Modelo Digital de Elevação, 9  
morfodinâmica, 14

### O

ordenamento territorial, 0, 37, 47

### P

paisagem natural, 14  
planejamento ambiental, 1, 6

### R

resiliência, 10, 18, 25, 31  
rio Jequitinhonha, 0, 1, 6, 7, 8, 14, 21, 24, 26, 27, 28, 41

### S

sistema de informações geográficas, 46

### V

Vale do Jequitinhonha, 8

### Z

zoneamento ambiental, 18, 26, 28, 31, 33



**Pantanal Editora**

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000

Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil

Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp)

<https://www.editorapantanal.com.br>

[contato@editorapantanal.com.br](mailto:contato@editorapantanal.com.br)