



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

ELAINE CORDEIRO DOS SANTOS

**LÓGICA FUZZY APLICADA NA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE
AMBIENTAL DA VEGETAÇÃO NO BIOMA MATA ATLÂNTICA, ESTADO DO
ESPÍRITO SANTO, BRASIL**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2024

ELAINE CORDEIRO DOS SANTOS

**LÓGICA FUZZY APLICADA NA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE
AMBIENTAL DA VEGETAÇÃO NO BIOMA MATA ATLÂNTICA, ESTADO DO
ESPÍRITO SANTO, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.
Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos
Coorientadora: Dra. Taís Rizzo Moreira

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2024

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

S237l Santos, Elaine Cordeiro dos, 1996-
Lógica fuzzy aplicada na avaliação da vulnerabilidade
ambiental da vegetação no bioma Mata Atlântica, estado do Espírito
Santo, Brasil. / Elaine Cordeiro dos Santos. - 2024.
84 f. : il.

Orientador: Alexandre Rosa dos Santos.
Coorientadora: Taís Rizzo Moreira.
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências
Agrárias e Engenharias.

1. Geotecnologia. 2. Inteligência artificial. 3. Análise
ambiental. 4. Conservação da natureza. I. Santos, Alexandre Rosa
dos. II. Moreira, Taís Rizzo. III. Universidade Federal do Espírito
Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 630

**LÓGICA FUZZY APLICADA NA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL
DA VEGETAÇÃO NO BIOMA MATA ATLÂNTICA, ESTADO DO ESPÍRITO SANTO,
BRASIL**

Elaine Cordeiro dos Santos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 22 de fevereiro de 2024.

Documento assinado digitalmente
 **ROSANE GOMES DA SILVA ANDRADE**
Data: 23/02/2024 09:04:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Rosane Gomes da Silva Andrade (Examinadora externa)
Instituto Federal do Norte de Minas Gerais

Documento assinado digitalmente
 **JEFERSON LUIZ FERRARI**
Data: 23/02/2024 10:41:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jeferson Luiz Ferrari (Examinador externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo

Documento assinado digitalmente
 **JEFERSON PEREIRA MARTINS SILVA**
Data: 23/02/2024 10:57:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Jeferson Pereira Martins Silva (Examinador externo)
Courageous Land

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE ROSA DOS SANTOS**
Data: 22/02/2024 22:03:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

A todos que perseveraram
com coragem na realização dos seus
sonhos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me guiou em todos os caminhos na busca de maior conhecimento e realização dos meus sonhos.

Aos meus familiares, em especial as minhas amadas irmãs, Deise, Jéssica, Juliana e Jaqueline, por nunca deixarem desistir daquilo que mais acreditei desde criança, pelo apoio e por sempre estarem presentes em minha vida.

Aos amigos que fiz aqui, em especial a Caroline Palácio com sua família, com o apoio necessário durante minha estadia em Jerônimo Monteiro.

Aos colegas do laboratório *Geotechnology Applied to Global Enviroment* (LabGAGEN), por momentos incríveis de troca de conhecimento, por todo apoio e carinho nos momentos em que mais precisei.

À Rita de Cássia Freire, meu primeiro contato na pós graduação, me ensinou muito sobre geotecnologia e a estrutura do mundo acadêmico, contribuiu significativamente para o meu desenvolvimento acadêmico.

À Coorientadora Dra. Taís Rizzo, pesquisadora admirável, agradeço o apoio e por contribuir de maneira ímpar para o desenvolvimento do trabalho, ensinando-me que as dificuldades não limitam as nossas competências, podendo ser superadas com dedicação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos, pela orientação do trabalho, os incentivos na jornada acadêmica na pós-graduação e conhecimentos transmitidos. Por sempre buscar o melhor para seus orientandos sendo exigente na qualidade dos trabalhos e pesquisas realizados.

Ao Programa de Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCFL), pela oferta do curso de mestrado e estrutura de pesquisa.

Aos professores, colegas do curso de pós-graduação, e servidores da Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes) pela convivência e troca de conhecimentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Obrigada CAPES, pelo financiamento da bolsa de pesquisa que me permitiu minha estadia e a realização desse estudo.

“Não importa o quão sombrio seja o presente! Não importa quantas vezes você falhe! O importante é seguir em frente e nunca desistir!”.

(Sensei Kakashi Hatake)

RESUMO

SANTOS, Elaine Cordeiro dos. **Lógica *Fuzzy* aplicada para a avaliação da vulnerabilidade ambiental da vegetação no bioma Mata Atlântica, Estado do Espírito Santo, Brasil**. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos. Coorientadora: Dra. Taís Rizzo Moreira.

A Mata Atlântica, um bioma de notável biodiversidade, enfrenta desafios de conservação devido à intensa pressão antrópica que se refere na perda contínua de áreas florestais. Com o objetivo de analisar as áreas mais suscetíveis à vulnerabilidade ambiental da vegetação no bioma Mata Atlântica do Espírito Santo, foram selecionadas dez variáveis, divididas em duas categorias: ambientais e antrópicas, para os anos de 2012 e 2022. Utilizaram-se dados do MapBiomas para Uso e Cobertura da Terra (UCT), Qualidade de Pastagem e Cicatrizes de Fogo, e do Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do estado do Espírito Santo (GEOBASES) para a Proximidade de Estradas. Aplicou-se a inferência Fuzzy na elaboração do mapa de vulnerabilidade ambiental, com cinco classes: Muito Alta, Alta, Moderada, Baixa e Muito Baixa. Posteriormente, confrontou-se o mapa de vulnerabilidade ambiental com as fitofisionomias do bioma Mata Atlântica, obtidas do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA). Nos anos analisados, a classe Pastagem foi a mais representativa em área de UCT, com uma redução de área de 2012 (21.740,78 km²) para 2022 (19.752,54 km²) o que se reflete na redução de área das categorias de Pastagem Severamente Degradada (970,492 km²), Moderadamente Degradada (96,092 km²) e Pastagem sem sinais de Degradação (921,65 km²). Em 2022, a área com vulnerabilidade ambiental Muita Alta reduziu, em relação ao ano de 2012. Tal redução foi menos acentuada na área ocupada pela fitofisionomia de Floresta Estacional Semidecidual (redução de 0,39 km²). Os resultados demonstraram a aplicação das geotecnologias e lógica fuzzy como ferramentas estratégicas na análise espacial e geração de dados ambientais. A integração dessas

técnicas possibilitou a análise das classes de vulnerabilidade ambiental com base nas variáveis estabelecidas, que podem servir de apoio à gestão e ao monitoramento de áreas de vegetação mais vulneráveis no estado do Espírito Santo.

Palavras-chave: Inteligência artificial, Conservação da natureza, Floresta Atlântica.

ABSTRAT

SANTOS, Elaine Cordeiro dos. **Fuzzy logic applied to assess the environmental vulnerability of vegetation in the Atlantic Forest biome, State of Espírito Santo, Brazil.** 2024. Dissertation (Master Degree in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Adviser: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos. Co-adviser: Dra. Taís Rizzo Moreira.

The Atlantic Forest, a biome of remarkable biodiversity, faces conservation challenges due to intense anthropogenic pressure resulting in continuous loss of forest areas. In order to analyze the areas most susceptible to environmental vulnerability of vegetation in the Atlantic Forest biome of Espírito Santo, ten variables were selected, divided into two categories: environmental and anthropogenic, for the years 2012 and 2022. Data from MapBiomas for Land Use and Cover (LUC), Pasture Quality and Fire Scars, and from the Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do estado do Espírito Santo (GEOBASES) for Road Proximity were used. Fuzzy inference was applied in the elaboration of the environmental vulnerability map, with five classes: Very High, High, Moderate, Low, and Very Low. Subsequently, the environmental vulnerability map was compared with the phytophysionomies of the Atlantic Forest biome, obtained from the Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA). In the years analyzed, the Pasture class was the most representative in LUC area, with a reduction in area from 2012 (21,740.78 km²) to 2022 (19,752.54 km²) which is reflected in the reduction of area in the categories of Severely Degraded Pasture (970.492 km²), Moderately Degraded (96.092 km²), and Pasture without signs of Degradation (921.65 km²). In 2022, the area with Very High environmental vulnerability decreased compared to the year 2012. This reduction was less pronounced in the area occupied by the phytophysionomy of Seasonal Semideciduous Forest (reduction of 0.39 km²). The results demonstrated the application of geotechnologies and fuzzy logic as strategic tools in spatial analysis and environmental data generation. The integration of these techniques enabled the analysis of environmental vulnerability classes based on established variables, which can support the

management and monitoring of the most vulnerable vegetation areas in the state of Espírito Santo.

Keywords: Artificial intelligence, Nature conservation, Atlantic Forest.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Espírito Santo, Brasil.....	33
Figura 2 - Fluxograma metodológico contendo as etapas para mapeamento da vulnerabilidade ambiental da vegetação.....	35
Figura 3 - Variáveis ambientais 2012 e 2022: Formação Florestal (FFL), Mangue (MANG), Restinga Arborizada (RE-ARB) e Restinga Herbácea (RE-HER)	37
Figura 4 - Variáveis antrópicas 2012 e 2022: Área Não Vegetada (ANV), Área Urbanizada (AUR), Pastagem Moderadamente Degradada (PMD), Pastagem Severamente Degradada (PSD), Cicatrizes de Fogo (CIF) e Rodovias (RD)	39
Figura 5 - Funções de pertinência aplicada a cada uma das variáveis ambientais: A1) Formação Florestal (FFL); B1) Mangue (MANG); C1) Restinga Arborizada (RE-ARB); D1) Restinga Herbácea (RE-HER).....	42
Figura 6 - Funções de pertinência aplicada a cada uma das variáveis antrópicas: A2) Área Não Vegetada (ANV); B2) Área Urbanizada (AUR); C2) Pastagem Moderadamente Degradada (PMD); D2) Pastagem Severamente Degradada (PSD); E2) Cicatrizes de Fogo (CIF); F2) Rodovias (RD)	42
Figura 7 – Classes de uso e cobertura da terra para o estado do Espírito Santo, para o ano de em 2012	46
Figura 8 – Classes de uso e cobertura da terra para o estado do Espírito Santo, para o ano de em 2022	48
Figura 9 - Valor de área em km ² e percentagem para as categorias de pastagem, em relação ao estado de conservação.....	50
Figura 10 - Efeito das funções de pertinência sobre as variáveis ambientais.....	51
Figura 11 – Efeito das funções de pertinência sobre as variáveis antrópicas	52
Figura 12 – Vulnerabilidade ambiental da vegetação no Bioma Mata Atlântica para o estado do Espírito Santo	53
Figura 13 – Categoria de qualidade das pastagens dentro das diferentes classes de vulnerabilidade em 2012 e 2022, no estado do Espírito Santo, Brasil	58
Figura 13 – Fitofisionomias do Bioma Mata Atlântica no estado do Espírito Santo	59
Figura 15 - Valores de área em km ² das fitofisionomias dentro das classes de vulnerabilidade ambiental.....	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	17
2.1OBJETIVO GERAL	17
2.2OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1CONCEITO DE BIOMA	18
3.2 BIOMA MATA ATLÂNTICA IMPORTÂNCIA ECOLÓGICA E AMEAÇAS A BIODIVERSIDADE.....	21
3.3FITOFISIONOMIAS DA MATA ATLÂNTICA	23
3.4VULNERABILIDADE AMBIENTAL	25
3.5FRAGMENTAÇÃO FLORESTAL.....	27
3.6USO DA GEOTECNOLOGIA PARA ANÁLISE AMBIENTAL.....	29
3.7LÓGICA FUZZY	30
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	33
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	33
4.2 ETAPAS METODOLÓGICAS PARA VULNERABILIDADE AMBIENTAL.....	34
4.2.1 ETAPA 01- DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL E AQUISIÇÃO DA BASE DE DADOS.....	36
4.2.2 ETAPA 02 – ESPACIALIZAÇÃO DA DISTÂNCIA EUCLIDIANA.....	40
4.2.3 ETAPA 03 – PADRONIZAÇÃO DAS IMAGENS DE DISTÂNCIA E APLICAÇÃO DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA FUZZY	40
4.2.4 ETAPA 04 – APLICAÇÃO DO OPERADOR FUZZY GAMA PARA OBTER AS CLASSES DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL	44
4.2.5 ETAPA 05 – ANÁLISE DE VULNERABILIDADE E CONFRONTO COM AS FITOFISIONOMIAS.....	45
5 RESULTADOS	45
5.1USO E COBERTURA DA TERRA MAPBIOMAS 2012 E 2022	45
5.2VARIÁVEIS FUZZIFICADAS	51
5.3VULNERABILIDADE AMBIENTAL	52
5.4CLASSES DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL DENTRO DO USO E COBERTURA DA TERRA.....	54
5.5VULNERABILIDADE AMBIENTAL NAS FITOFISIONOMIAS DA VEGETAÇÃO DO BIOMA MATA ATLÂNTICA NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO.	58
6 DISCUSSÃO.....	62
7 CONCLUSÃO	67
8 REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica enfrenta uma acentuada fragmentação, sendo um dos biomas mais ameaçados do planeta, com mais de 90% de sua área original destruída pelas ações antrópicas, como urbanização, agricultura, pecuária e exploração madeireira (SCARANO; CEOTTO, 2015; REIS; RIBEIRO; DA SILVA, 2020). Este bioma abriga elevada taxa de espécies endêmicas, algumas das quais estão em risco de extinção (ICMBIO; MMA, 2018). A fragilidade da Mata Atlântica constitui o foco central de diversos estudos relacionados à conservação e à preservação no Brasil, uma vez que é reconhecida internacionalmente como um *hotspot* de biodiversidade (MUKRIMAA et al., 2016; RIBEIRO et al., 2009).

Entre os processos que representam sérias ameaças à biodiversidade no bioma Mata Atlântica, destacam-se o desmatamento, com a remoção de áreas florestais para agricultura e urbanização, resultando na perda de habitats e na liberação de carbono na atmosfera. Concomitantemente, a fragmentação que divide habitats contínuos, provoca isolamento de populações e aumento da vulnerabilidade (BRANCO et al., 2021). A divisão de uma floresta contínua em porções menores altera severamente as interações bióticas e abióticas, afetando o equilíbrio do ecossistema. À medida que o desmatamento avança, o isolamento dos remanescentes florestais se intensifica, diminuindo a capacidade de recuperação das funções ecológicas (AQUINO; PALETTA; ALMEIDA, 2017).

O bioma Mata Atlântica, sendo uma floresta tropical, possui ecossistemas diversos, e exibe diferentes respostas à pressão antrópica. Essas variações são moldadas pelas características naturais inerentes e pelo histórico de degradação (MMA, 2007; ALMEIDA, 2016). As constantes interferências na paisagem e a crescente exposição à ação humana impulsionam o surgimento de áreas com maior vulnerabilidade ambiental (PRADO; VASCONCELOS; CHIODI, 2014; LIMA; FRANCISCO; BOHRER, 2017; PIZANI; AZEVEDO; SOUZA, 2017).

A vulnerabilidade é definida pelo grau de suscetibilidade do ambiente a perturbações, por fatores naturais e antrópicos. Essa condição é avaliada por meio da capacidade de resiliência aos impactos, isto é, a habilidade de resistir e se regenerar de maneira autônoma, sem depender de intervenções externas (PRADO; VASCONCELOS; CHIODI, 2014; SOUSA; DE, 2021).

Cada área possui uma condição intrínseca que, em interação com o evento provocador, resulta em diferentes efeitos adversos. Esta condição é o que define a vulnerabilidade, e sua medição envolve observar e quantificar as relações entre as características do meio, os eventos induzidos e os efeitos adversos(MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA - MMA, 2007).

Compreender a interação entre os elementos naturais e humanos, bem como identificar o maior potencial de risco para o meio ambiente, torna-se fundamental para desenvolver estratégias eficientes na redução dos impactos adversos(REIS; RIBEIRO; DA SILVA, 2020). Nesse contexto, a investigação sobre a vegetação do bioma Mata Atlântica ganhou relevância, abrangendo diversas questões, como degradação, fragilidade, vulnerabilidade ambiental, incêndios florestais, fragmentação, criação de corredores ecológicos, entre outros temas (LOUZADA; SANTOS; SILVA, 2010; VICENTE DE ASSIS et al., 2014).

Na análise ambiental e monitoramento do bioma Mata Atlântica, o uso das geotecnologias como sistemas de informações geográficas (SIGs), sensoriamento remoto, associado a técnicas de inteligência artificial e algoritmos tem se destacado no estudo das interações dos elementos naturais e antrópicos que compõem a paisagem (MARCHESAN et al., 2019).

Essas Ferramentas possibilitam a coleta, processamento e análise espacial de dados ambientais, além disso geram informações das mudanças no ecossistema em escala temporal facilitam a compreensão das dinâmicas paisagísticas, planejamento e a gestão sustentável do meio ambiente(DA SILVA et al., 2023; MARDENI et al., 2023; PADILHA et al., 2016; RAMALHO et al., 2024; VICENTE DE ASSIS et al., 2014).

Ao empregar as geotecnologias na análise de vulnerabilidade ambiental, é possível identificar padrões e tendências de degradação bem como as regiões mais críticas, o que orienta de forma mais precisa as ações de conservação e recuperação (SANTOS, et al., 2015) A lógica Fuzzy, técnica de inteligência artificial, tem sido empregada em estudos ambientais, pois fornece uma abordagem flexível, se adaptando a complexidade e incerteza dos fenômenos no ambiente (ESCADA, 1998).

Diferente da lógica binária clássica, a lógica Fuzzy trabalha com as relações não lineares, subjetividade nas decisões, admitindo graus de pertinência dentro do intervalo de 0 e 1 (MARRO et al., 2010). A aplicação fuzzy desempenha um papel importante no contexto do zoneamento ambiental, pois facilita a identificação de áreas com distintos níveis de vulnerabilidade. Além disso, proporciona flexibilidade na tomada de decisão, contribuindo assim para uma gestão mais eficaz do território (PAULA; SOUZA, 2007; DOS SANTOS et al., 2017; PENHA; FONSECA; KORTING, 2017).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a vulnerabilidade ambiental da vegetação do bioma Mata Atlântica no estado do Espírito Santo, propondo o uso da inferência fuzzy na análise das variáveis ambientais e antrópicas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a vulnerabilidade ambiental da vegetação na Mata Atlântica do estado do Espírito Santo, a partir do conjunto de variáveis antrópicas e ambientais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mapear as variáveis antrópicas e ambientais que influenciam a vulnerabilidade da vegetação dentro do Bioma Mata Atlântica no estado do Espírito Santo, em diferentes anos (2012 e 2022), fornecendo informações úteis para o planejamento e gestão ambiental regional;
- Analisar as classes de vulnerabilidade ambiental da vegetação dentro do Bioma Mata Atlântica no estado do Espírito Santo, em função das variáveis selecionadas para o ano de 2012 e 2022;
- Avaliar o grau de vulnerabilidade nas diferentes fitofisionomias dentro do Bioma Mata Atlântica no estado do Espírito Santo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONCEITO DE BIOMA

Para compreender melhor as características que constituem o bioma Mata Atlântica, é importante fundamentar primariamente a ideia de bioma. O termo bioma, tem sido usado de forma ampla, para separar diferentes ecossistemas, baseando-se nos processos de formação, ocorrência de espécies (fauna e flora), estrutura da paisagem e condições climáticas(LIMA, M. S. de; SILVA; SILVA, 2021).

A origem do termo "bioma" remonta ao grego, em que “Bio” significa vida e “oma” refere-se a um grupo ou massa. Diversas definições foram integradas ao conceito original, visando abranger a riqueza de elementos que compõem um bioma, considerando as interações intrínsecas entre os aspectos bióticos e abióticos (MONCRIEFF; BOND; HIGGINS, 2016).

Segundo Coutinho (2006) o conceito foi atribuído a Frederic Edward Clements (1874-1945), um botânico norte-americano. Na sua obra “*Dynamics of Vegetation*” de 1949, Clements define o termo bioma no glossário, como uma comunidade de plantas e animais, tipicamente no nível de uma formação, ou seja, uma comunidade biótica. Frederic Edward Clements é reconhecido por seus diversos estudos para ecologia, incluindo a teoria da sucessão ecológica da vegetação (MARTINS; MARTINS, 2020).

Um dos principais conceitos de bioma mais utilizados é o de Coutinho (2006) que se baseou na definição de Walter, (1986) e descreve bioma como:

“...uma área do espaço geográfico, com dimensões até superiores a um milhão de quilômetros quadrados, representada por um tipo uniforme de ambiente, identificado e classificado de acordo com o macroclima, a fitofisionomia (formação), o solo e a altitude, os principais elementos que caracterizam os diversos ambientes continentais” (Coutinho, 2006, p.14).

Conforme a descrição do IPAM (2023), os biomas são conjuntos de vegetação semelhantes que ocorrem em áreas com condições geográficas e climáticas parecidas. Os ecossistemas são agrupados com base em características de vegetação, relevo e o clima. A classificação dessas grandes formações vegetais em biomas começou a surgir quando perceberam que várias regiões do planeta possuíam diversidades biológicas semelhantes, embora estivessem em continentes diferentes.

Para o IBGE (2023), bioma é um grupo de espécies vegetais e animais formado por um agrupamento de tipos de vegetação intimamente relacionados e regionalmente reconhecíveis que compartilham condições geológicas e climáticas semelhantes e que historicamente experimentaram os mesmos processos de formação de paisagem, resultando na diversidade de sua flora e fauna.

O conceito de biota e bioma são frequentemente confundidos e comumente, usados como sinônimos. O primeiro se refere a toda parte viva de um ecossistema (micro-organismos, fauna, flora e outros seres vivos. Já o segundo é entendido como uma unidade biológica e geográfica que inclui uma extensão de área com características climáticas, relevo, fauna, flora e ecossistemas semelhantes (BEZZON; DINIZ, 2020).

Em resumo, os biomas são classificados com base nas condições ambientais prevaletentes e nas espécies que estão adaptadas as condições específicas (BATALHA, 2011). Para a compreensão de bioma é necessária uma considerar os conceitos abordados por pesquisadores de diversas áreas de atuação, os fatores ambientais e os processos históricos e evolutivos no planeta (ALBUQUERQUE et al., 2022).

Moncrieff, Bond, Higgins (2016) apontaram em seu trabalho que há mais do que fatores ambientais para determinar a distribuição e natureza da biota e formação dos biomas. Destacam que o determinismo climático está sendo minado por evidências de regiões ambientalmente semelhantes, mas floristicamente distintas e possibilidade de múltiplos biomas estáveis nas combinações de influências climáticas. Os autores sugerem a inclusão de informações sobre a evolução biótica, mapeamento direto da estrutura e função

para compreensão dos biomas, sua abrangência e previsão como eles serão distribuídos no futuro.

Os biomas são extremamente importantes para classificar e compreender a diversidade ambiental no planeta Terra. Portanto, existem diferentes biomas em diferentes partes do mundo com características únicas (endêmicas) e de diversidade (COUTINHO, 2006). Os biomas brasileiros são ecossistemas únicos e diversificados, que abrigam uma grande diversidade de flora e fauna. O Brasil possui seis biomas: Amazônia, Mata Atlântica, Cerrado, Caatinga, Pantanal e Pampa. Cada um desses biomas possui características específicas nas áreas de ocorrência (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA - MMA, 2023a).

A Amazônia é o maior bioma do Brasil em área, caracterizado por sua densa floresta tropical, rios de grande extensão, sendo constituído por diferentes ecossistemas como as florestas densas de terra firme, florestas estacionais, florestas de igapó, campos alagados, várzeas, savanas, refúgios montanhosos e formações pioneiras (INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS – IBF, 2018).

A Mata Atlântica é outro bioma de grande importância, conhecida por sua biodiversidade exuberante e com uma grande variedade de espécies vegetais e animais endêmicas. Este bioma apresenta uma vegetação densa, incluindo outras formações florestais (OLIVEIRA; ENGEL, 2017).

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, apresenta estratos arbóreo e arbustivo-herbáceo definidos, uma vegetação de savana com rica biodiversidade adaptada às condições de clima sazonal com estações secas e úmidas (SOUSA et al., 2009).

A Caatinga é um bioma exclusivamente brasileiro, apresenta clima semiárido, com vegetação adaptada à escassez de água. Sua paisagem é marcada por solos áridos e rochosos, com presença de cactos e plantas espinhosas (EMBRAPA, 2022).

O Pantanal é a maior área alagada do mundo, caracterizado por sua diversidade de habitats, incluindo áreas alagadas sazonalmente, campos abertos e florestas ribeirinhas e possui uma rica diversidade de vida selvagem, incluindo aves, peixes e mamíferos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2023b) Por fim, o Pampa é um bioma de campos subtropicais, com uma

vegetação campestre (gramíneas, herbáceas e algumas árvores) de gramíneas e uma fauna adaptada a esse ambiente (INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS - IBF, 2023).

3.2 BIOMA MATA ATLÂNTICA IMPORTÂNCIA ECOLÓGICA E AMEAÇAS A BIODIVERSIDADE.

A Mata Atlântica, é uma floresta tropical que se estende ao longo da costa brasileira, reconhecida como um dos biomas mais biodiversos devido à sua riqueza inigualável de espécies vegetais e animais (FUNDAÇÃO SOS PRO-MATA ATLÂNTICA, 2022). No entanto, é também um dos biomas brasileiros mais ameaçados pelas interferências antrópicas em seu território (BRANCO et al., 2021).

O bioma Mata Atlântica está presente em vários estados brasileiros, incluindo o Espírito Santo, Rio de Janeiro, Santa Catarina, e parte dos territórios de Alagoas, Bahia, Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraíba, Paraná, Pernambuco, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, São Paulo e Sergipe. Composto por uma ampla variedade de ecossistemas, esse bioma abrange diversos conjuntos de ecossistemas florestais, apresentando estruturas e composições florais bastante distintas, que seguem as características climáticas da região em que ocorrem (INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS – IBF, 2020).

A riqueza da Mata Atlântica reside na sua variedade de ecossistemas, desde florestas exuberantes a áreas costeiras como manguezais e restingas. Com mais de 20 mil espécies de plantas identificadas, incluindo árvores majestosas, orquídeas delicadas e uma infinidade de plantas medicinais, esse bioma abriga uma enorme diversidade botânica, muitas das quais ainda desconhecidas pela ciência (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2022).

No entanto, a biodiversidade da Mata Atlântica enfrenta ameaças iminentes. O desmatamento, a expansão urbana, a agricultura e outras atividades humanas têm causado uma rápida perda de habitat e fragmentação do ecossistema. Muitas espécies endêmicas estão em perigo, e algumas correm

risco de extinção devido a essas pressões (PRADO; VASCONCELOS; CHIODI, 2014).

Outro desafio para conservação do bioma Mata Atlântica é a dificuldade em conciliar o modo de produção e o sistema econômico atual, com a expansão dos fragmentos de vegetação nativa. Além da proximidade com as áreas urbanas, as demandas internas e de exportação, atividades industriais e agropecuárias pressionam os remanescentes florestais (PBMC, 2014; ALMEIDA, 2016).

No contexto de políticas públicas os fragmentos do bioma Mata Atlântica são protegidos pela legislação ambiental, que estabelece critérios de utilização e proteção da vegetação nativa no Brasil (BRASIL, 2012a, b). Mas as expansões das áreas do bioma ainda são restritas, com a perda de espaço para as atividades antrópicas que estão próximas aos fragmentos, que ameaça à integridade da floresta (SANTOS, F. C. dos et al., 2017) (SANTOS, Flávio Costa dos et al., 2017).

A melhor distribuição espacial de vegetação nativa ainda tem sido pauta para as políticas públicas vigentes e para ambientalistas (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA - MMA, 2023b). Os fragmentos pequenos e isolados da matriz não conseguem se estabelecer do ponto de vista ecológico, com isso, há menor fluxo gênico (movimento de genes de uma população para outra), fundamental para a manutenção de biodiversidade das espécies. O baixo fluxo gênico resulta em espécies tão divergentes entre si que se tornam incapazes de produzir descendentes, levando ao isolamento reprodutivo (ZAU, 1998).

Por outro lado, a homogeneização genética, resultante do cruzamento, seja ele natural ou artificial, entre espécies com algum grau de parentesco (endogamia), também afeta a diversidade. Esse fenômeno é observado em comunidades isoladas, onde as populações tendem a ser mais semelhantes geneticamente e, conseqüentemente, mais susceptíveis a pragas e doenças. A menor capacidade de adaptação a alterações ambientais pode levar à redução da quantidade de indivíduos e, eventualmente, à extinção de espécies, sobretudo aquelas endêmicas (SANTOS; NASCIMENTO, 2023).

A complexidade em restaurar ambientes fragmentados decorre das características intrínsecas de cada mancha florestal, seu estado de degradação, proximidade dos fatores e risco à vulnerabilidade (JARDIM LEITE; MELO JÚNIOR, 2020). As barreiras físicas, como estradas, dificultam diversas síndromes de dispersão da flora, o movimento da fauna silvestre em busca de alimento de um fragmento para outro (SOUSA et al., 2009). Nas rodovias ocorre atropelamentos frequentes que, por sua vez, agravam a redução no número das espécies. O efeito gradativo na teia alimentar se desenvolve, à medida que ocorrem flutuações no número de predador e presa (ICMBIO; MMA, 2018).

A conservação desse bioma é crucial não apenas para o Brasil, mas para o mundo. A Mata Atlântica desempenha um papel vital na regulação do clima, na proteção dos recursos hídricos e na manutenção da biodiversidade global. Seus ecossistemas são fundamentais para a qualidade do ar, solo e água, influenciando diretamente a vida humana e animal em escala global (BRASIL, 2000, 2006; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2023a).

Preservar a Mata Atlântica exige ação imediata e esforços coordenados. Iniciativas de conservação, como a criação de unidades de conservação, restauração de áreas degradadas, políticas de desenvolvimento sustentável e o engajamento da sociedade são essenciais para proteger e restaurar esse tesouro natural (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 2017).

Em resumo, a biodiversidade no bioma Mata Atlântica representa um patrimônio de valor incalculável que requer proteção e preservação para todas as formas de vida que o compõem, sendo fundamentais para a sustentabilidade global. Portanto, estudar o impacto ambiental e propor medidas de proteção para este bioma é um compromisso para as presentes e futuras gerações (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2023a).

3.3 FITOFISIONOMIAS DA MATA ATLÂNTICA

A Mata Atlântica é um bioma extremamente diversificado, apresenta uma variedade de fitofisionomias, que são conjuntos de características físicas e biológicas, como a vegetação, topografia e condições climáticas, que distinguem

diferentes áreas dentro desse bioma. Essas variações resultam em uma riqueza de paisagens e ecossistemas dentro da Mata Atlântica (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2022).

As fitofisionomias encontradas neste bioma incluem: Floresta Ombrófila Densa; Floresta Ombrófila Mista, também denominada de Mata de Araucárias; Floresta Ombrófila Aberta; Floresta Estacional Semidecidual; e Floresta Estacional Decidual, e ecossistemas associados (manguezais, vegetações de restingas, campos de altitude, brejos interioranos e encraves florestais do Nordeste) (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA - MMA, 2023a).

Fitofisionomia é um termo da botânica que refere-se à expressão externa e à forma estrutural que caracteriza a formação das vegetação em um determinado ambiente (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2022). Este conceito é fundamental para compreender a diversidade e distribuição dos grupos vegetais em diferentes ecossistemas. A fitofisionomia além da classificação botânica, abrange características visíveis das plantas, como altura, densidade, estrutura foliar e disposição espacial (COUTINHO, 2006). Dessa forma, permite uma compreensão mais completa das interações entre as plantas e seu ambiente, considerando não apenas aspectos taxonômicos, mas também ecológicos (GARBIN et al., 2017).

No contexto da ecologia, a análise fitofisiológica desempenha uma função importante na identificação de padrões ecológicos. Avaliar a diversidade natural e compreender os processos evolutivos que moldam as comunidades vegetais ao longo do tempo. Além disso, as categorizações da fisiologia vegetal são frequentemente utilizadas para a gestão ambiental do território, nas categorias de Unidades de Conservação e na formulação de políticas públicas destinadas a proteger os ecossistemas e sua biodiversidade (BRASIL, 2000).

Com estudo da fitofisionomia, os cientistas podem mapear e acompanhar alterações nas paisagens naturais, identificar áreas de importância ecológica, bem como propor estratégias de conservação adequadas às características específicas de cada formação (THOMAZ, 2010; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2022) (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2022).

Entender a dinâmica que ocorre em cada tipo de formação florestal, provendo informações para a gestão sustentável dos recursos naturais (GARBIN et al., 2017).

A Floresta Ombrófila Densa é caracterizada pela densidade exuberante, de árvores altas que formam múltiplas camadas de vegetação. Esse tipo de vegetação, recebe uma quantidade significativa de chuvas ao longo do ano, possui grande biodiversidade, habitat uma infinidade de espécies vegetais e animais. Ela predomina em áreas de encostas e vales (APREMAVI, 2023).

Já a Floresta Ombrófila Mista, conhecida como Mata de Araucárias, é encontrada em regiões de altitude mais elevada, como serras e planaltos. Caracterizada pela presença predominante de Araucárias, essa floresta exibe uma beleza peculiar, com suas árvores imponentes e um ambiente adaptado às condições específicas dessas regiões mais frias (APREMAVI, 2023).

A Floresta Ombrófila Aberta representa uma transição entre a densa floresta atlântica e os campos. Com um espaçamento maior entre as árvores, ela forma uma paisagem mais aberta e mista, combinando elementos das florestas e dos campos, abrigando uma variedade de espécies arbóreas e herbáceas (GARBIN et al., 2017).

As Florestas Estacionais, tanto Semidecidual quanto Decidual, distinguem-se por sua resposta à sazonalidade das chuvas. Durante a estação seca, essas florestas perdem parte de suas folhas, sendo essa queda mais pronunciada na Floresta Estacional Decidual. Com árvores de porte médio e uma biodiversidade um pouco menor que a das florestas ombrófilas densas, essas áreas desempenham um papel crucial na conectividade ecológica e na conservação da diversidade biológica da Mata Atlântica (APREMAVI, 2023).

3.4 VULNERABILIDADE AMBIENTAL

Conforme definido por Aquino, Paletta & Almeida, (2017), a vulnerabilidade ambiental é avaliada pelo grau de suscetibilidade ou incapacidade de um sistema natural em resistir aos efeitos das interações

externas. Essa condição pode ser atribuída a características ambientais naturais, à pressão humana ou mesmo a sistemas sensíveis com baixa resiliência. Portanto, está relacionada à capacidade tangível do ambiente de retornar ao seu estado natural original para superar uma situação crítica.

A palavra “vulnerável” está relacionada com o potencial de degradação, da condição de resiliência ou suscetibilidade a riscos. Em uma paisagem, a vulnerabilidade natural está associada à capacidade e estabilidade dos fatores bióticos e abióticos que a constituem, nos quais as alterações ocorrem naturalmente, como causa dos agentes intempéricos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA - MMA, 2007).

Nas últimas décadas, observa-se as mudanças provocadas pelo homem no ambiente que causaram diversos problemas ambientais. Santos (2015) aponta outra questão importante sobre as alterações da paisagem natural. Para o autor os danos ambientais não aparecem uniformemente em todo território e são mais visíveis nas áreas onde vivem populações vulneráveis economicamente.

Embora muito relacionados e confundidos, os termos fragilidade e vulnerabilidade ambiental apresentam diferenças sutis. A fragilidade é a susceptibilidade intrínseca de um ecossistema a sofrer danos ou degradação em resposta a mudanças ambientais ou ações humanas. A resistência natural de um ambiente e à sua capacidade de se recuperar de perturbações por fatores de riscos como a geologia, o tipo de solo, a cobertura vegetal e outros elementos físicos do ambiente (LIRA; FRANCISCO; FEIDEN, 2022; SANTOS, J. de O., 2015).

A vulnerabilidade ambiental envolve a capacidade do ambiente, comunidade ou população de resistir, se adaptar e se recuperar dos eventos adversos ou perturbações. Isso implica em apresentar maior resiliência, sensibilidade às mudanças e à sua habilidade de se ajustar a elas. Apresenta outros fatores como socioeconômicos, políticos, e espaciais que influenciam na capacidade de enfrentar e recuperar-se de impactos negativos (BRASIL, 2007; CAVALCANTE *et al.*, 2010; PRADO; VASCONCELOS; CHIODI, 2014; AQUINO; PALETTA; ALMEIDA, 2017; PIZANI; AZEVEDO; SOUZA, 2017; GONÇALVES *et al.*, 2022).

Quando uma perturbação é causada, a reação do ambiente pode ser muito diferente, dependendo das características naturais e humanas locais, ou seja, cada parte da área possui um estado natural que, em combinação com o tipo e a escala do evento causado, leva à extensão dos efeitos nocivos (SANTOS, R. F. dos, 2007).

Ao analisar os fatores de risco socioambientais em áreas urbanas e verificar a relação existente entre as desigualdades sociais e a vulnerabilidade ambiental. Gonçalves *et al.* (2022) observam que os riscos, estão associados a um uso e ocupação inadequados dos ambientes de maior fragilidade pelas populações mais vulneráveis.

O bioma Mata Atlântica, reconhecido como um *hotspot* global de biodiversidade devido à sua elevada taxa de endemismo, enfrenta sérias ameaças ambientais, como desmatamento, incêndios e fragmentação. Esta fragilidade o torna mais vulnerável aos impactos antrópicos em seu território. Os incêndios florestais de grandes proporções, por exemplo, podem destruir os remanescentes de uma vez, aumentar a exposição do solo florestal para processos erosivos e dificultar o processo de regeneração natural (DALL'IGNA; MANIESI, 2022).

3.5 FRAGMENTAÇÃO FLORESTAL

O processo de fragmentação florestal é observado quando uma área extensa é subdividida em vários fragmentos pequenos e muitas vezes isolados uns dos outros. Nos fragmentos menores, ocorrem mudanças físicas e biológicas, pois é alterada a dinâmica dos ecossistemas florestais (ZAÚ, 1998). Isto resulta na subdivisão dos habitats e no aumento do isolamento entre as espécies. Observam-se também mudanças ambientais, com variações de temperatura, especialmente nas áreas internas e nas bordas desses fragmentos, quando comparadas a florestas contínuas (DECIAN et al., 2016).

O processo de fragmentação ocorre por processos naturais e/ou por ações antrópicas. No primeiro caso, as alterações nos ecossistemas ocorrem devido a eventos locais e de escala global, resultando na diminuição das áreas de vegetação natural, provocada por fatores como as características

topográficas, variações nos tipos de solo, mudanças climáticas significativas, ocorrência de incêndios, deslizamentos de terra, erosão e até mesmo erupções vulcânicas (LIMA, B. C.; FRANCISCO; BOHRER, 2017). Já as causas antrópicas incluem desmatamento, urbanização, extração madeireira, introdução de espécies exóticas, atividades agropecuárias, mineração e construção de estradas (MORAES et al., 2017).

A fragmentação florestal é um fenômeno comum em ecossistemas naturais devido a atividades humanas e é impulsionada por uma série de causas inter-relacionadas. A expansão urbana e agrícola figuram entre as principais razões, à medida que áreas anteriormente contínuas de vegetação são convertidas em espaços urbanos, campos agrícolas e infraestrutura associada (DECIAN et al., 2016).

A construção de estradas também desempenha um papel significativo, dividindo habitats e criando barreiras físicas que podem isolar populações de plantas e animais. Além disso, práticas de manejo florestal não sustentável, como o desmatamento seletivo, contribuem para a fragmentação ao remover seletivamente árvores de valor comercial, deixando áreas fragmentadas e mais vulneráveis às mudanças ambientais. A fragmentação resultante pode ter impactos graves na biodiversidade, aumentando a suscetibilidade a doenças, reduzindo o tamanho efetivo das populações e prejudicando a conectividade genética entre diferentes subpopulações (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 2017).

Um dos principais impactos para a biodiversidade da Mata Atlântica é a perda de habitat e a redução da conectividade entre os fragmentos remanescentes. Isso leva à diminuição das áreas disponíveis para muitas espécies de flora e fauna, o que pode resultar em extinções locais e na perda de diversidade genética. Animais que precisam de áreas extensas para se alimentar, reproduzir ou migrar são particularmente afetados, enfrentando dificuldades para encontrar recursos e se movimentar entre os fragmentos (PADILHA et al., 2016).

Além disso, a fragmentação torna as áreas remanescentes mais suscetíveis a impactos ambientais, como mudanças climáticas, invasão de espécies exóticas e aumento de distúrbios naturais. A redução da diversidade

genética torna as populações mais vulneráveis a doenças e alterações ambientais, reduzindo sua capacidade de adaptação a mudanças no ambiente (KULEVICZ et al., 2020).

A fragmentação florestal na Mata Atlântica também influencia os serviços ecossistêmicos, afetando diretamente a qualidade da água, a regulação do clima, a polinização e a fertilidade do solo. Esses serviços são fundamentais para a sobrevivência de ecossistemas saudáveis e para a qualidade de vida das comunidades humanas que dependem dos recursos naturais fornecidos por essas florestas (FUNDAÇÃO SOS PRO-MATA ATLÂNTICA, 2021).

Diante dessa realidade, é fundamental adotar medidas efetivas para mitigar os impactos da fragmentação e promover a conservação da Mata Atlântica. Estratégias de restauração de áreas degradadas, a criação e ampliação de corredores ecológicos para conectar os fragmentos florestais, bem como a implementação de políticas de uso da terra que favoreçam a preservação, são passos cruciais para reverter esse cenário (PADILHA et al., 2016).

Além disso, é imprescindível o envolvimento da sociedade, governos e organizações não governamentais na promoção de práticas sustentáveis e na conscientização sobre a importância da preservação da Mata Atlântica. A educação ambiental desempenha um papel crucial na sensibilização e mobilização de esforços para proteger e restaurar esse bioma singular (INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS – IBF, 2020).

Em síntese, a fragmentação florestal na Mata Atlântica representa uma ameaça significativa para a biodiversidade e a saúde dos ecossistemas. A busca por soluções sustentáveis e ações concretas são essenciais para a conservação desse bioma, assegurando não apenas a sobrevivência de inúmeras espécies, mas também a qualidade de vida das gerações presentes e futuras (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2023a).

3.6 USO DA GEOTECNOLOGIA PARA ANÁLISE AMBIENTAL

A geotecnologia é uma área multidisciplinar da ciência que utiliza a tecnologia de informação geoespacial para coletar, analisar, interpretar e

visualizar informações relacionadas à terra. Este campo abrange uma diversidade de ferramentas e técnicas, incluindo sistemas de informação geográfica (SIG's), sensoriamento remoto (SR), Sistema de navegação por satélite (GNSS), algoritmos e modelagem geoespacial (EUGENIO et al., 2017). Ela integra a informação geográfica com o ambiente tecnológico, para estudar diferentes fenômenos da natureza.

Os algoritmos aplicados a modelos na análise ambiental, são combinados com geotecnologias e técnicas de inteligência artificial. A Classificação de Imagens como Support Vector Machines (SVM), Redes Neurais Artificiais (ANN) e Random Forest são comumente usados para classificar imagens de sensoriamento remoto e identificar diferentes tipos de cobertura terrestre (SALES RODRIGUES AQUINO et al., 2016).

A análise espacial integra todas as dimensões do objeto por meio dos procedimentos sequenciais a partir das variáveis analisadas, permitindo uma interpretação mais coerente da realidade (CÂMARA et al., 2001). Na área ambiental é muito empregada desempenhando um papel importante na tomada de decisões para a implementação de projetos, mitigação de impactos negativos, políticas públicas, planejamento urbano, gestão ambiental, agricultura de precisão, monitoramento de recursos naturais, tomada de decisões estratégicas, entre outras diversos usos.

A abordagem dinâmica do ambiente SIG, ao fornecer uma compreensão holística, surge como uma ferramenta essencial na resolução de problemas complexos. Ao invés de simplesmente analisar partes isoladas, essa abordagem nos permite visualizar e compreender o todo, identificando interconexões e padrões que podem passar despercebidos em análises fragmentadas (INPE, 2006). Portanto, ao oferecer detalhes sobre a dinâmica em constante mudança do ambiente, possibilita a adaptação contínua, antecipação para desafios futuros e orienta estrategicamente na busca por soluções eficazes.

3.7 LÓGICA FUZZY

A lógica *fuzzy*, também conhecida como lógica nebulosa, foi elaborada pelo matemático Lotfi Zadeh na década de 1960. Esta abordagem estende o

conjunto de valores lógicos para incluir graus de verdade entre 0 e 1 e permite uma representação mais adequada de conceitos vagos e subjetivos presentes na linguagem natural (ESCADA, 1998). A aplicação da lógica *fuzzy* na área ambiental tem provado ser uma ferramenta poderosa para abordar a complexidade e a incerteza inerentes aos sistemas ambientais. Ela permite modelar variáveis ambientais que não são facilmente quantificáveis e explorar melhor os diferentes cenários, à medida que se aproxima entre os valores de 0 e 1 (SANTOS *et al.*, 2020; LIRA; FRANCISCO; FEIDEN, 2022; PAUTZ *et al.*, 2023; SCARAMUSSA *et al.*, 2023).

A lógica *fuzzy* é uma abordagem matemática aplicada quando há subjetividade, incerteza ou mesmo a imprecisão ao descrever um fenômeno, apontar respostas mais claras em situações complexas e auxilia na tomada de decisões. Em contraste com a lógica booleana, que opera com valores binários (verdadeiro/falso), a lógica *fuzzy* permite que as variáveis tenham graus de pertinência em um contínuo, ou seja, valores entre 0 e 1 (MARRO *et al.*, 2010). Por essa razão, a lógica *fuzzy* é uma escolha apropriada para representar o nível de vulnerabilidade ambiental, uma vez que a definição de alto ou baixo pode variar de acordo com o contexto e as percepções individuais (PENHA; FONSECA; KORTING, 2017).

Os operadores *fuzzy* são funções matemáticas aplicadas a conjuntos ou a variáveis *fuzzy*, com o objetivo de representar o comportamento desses elementos, que podem pertencer a várias classes com diferentes graus de pertinência. Diversos operadores são empregados para gerar mapas com a sobreposição de várias camadas fuzzificadas. Entre esses operadores, destacam-se o “*fuzzy and*”, utilizado para determinar a interseção; o “*fuzzy or*”, que representa a união; o “*fuzzy product*”, o operador “*fuzzy gamma*”, é resultado do produto algébrico do “*fuzzy sum*” e do produto “*fuzzy product*”, ambos elevados a potência *gamma* que expressa a multiplicação entre as variáveis; o “*fuzzy sum*”, que indica a adição das variáveis (ESCADA, 1998).

Em vez de ter proposições totalmente verdadeiras ou totalmente falsas, as variáveis *fuzzy* podem assumir valores que refletem o grau de pertinência de um elemento a um conjunto. Isso é especialmente útil ao lidar com sistemas complexos nos quais a fronteira entre as categorias não é clara, como é

frequente o caso em domínios ambientais, onde as condições ecológicas podem ser multifacetadas e sujeitas a diversas (PENHA; FONSECA; KORTING, 2017).

A lógica fuzzy proporciona uma abordagem flexível para lidar com essa complexidade, sendo aplicada em diversos campos, incluindo controle de sistemas, tomada de decisões e modelagem de incerteza em ciências ambientais (MARRO et al., 2010).

A lógica *fuzzy* tem sido amplamente utilizada em estudos de avaliação de impacto ambiental, proporcionando uma abordagem flexível para gerenciar a incerteza dos dados e das variáveis envolvidas. Nela é possível incorporar a experiência de especialistas ambientais, combinando dados quantitativos e qualitativos para desenvolver sistemas de tomada de decisão mais robustos e adaptativos (PAULA; SOUZA, 2007; PELUZIO, 2017).

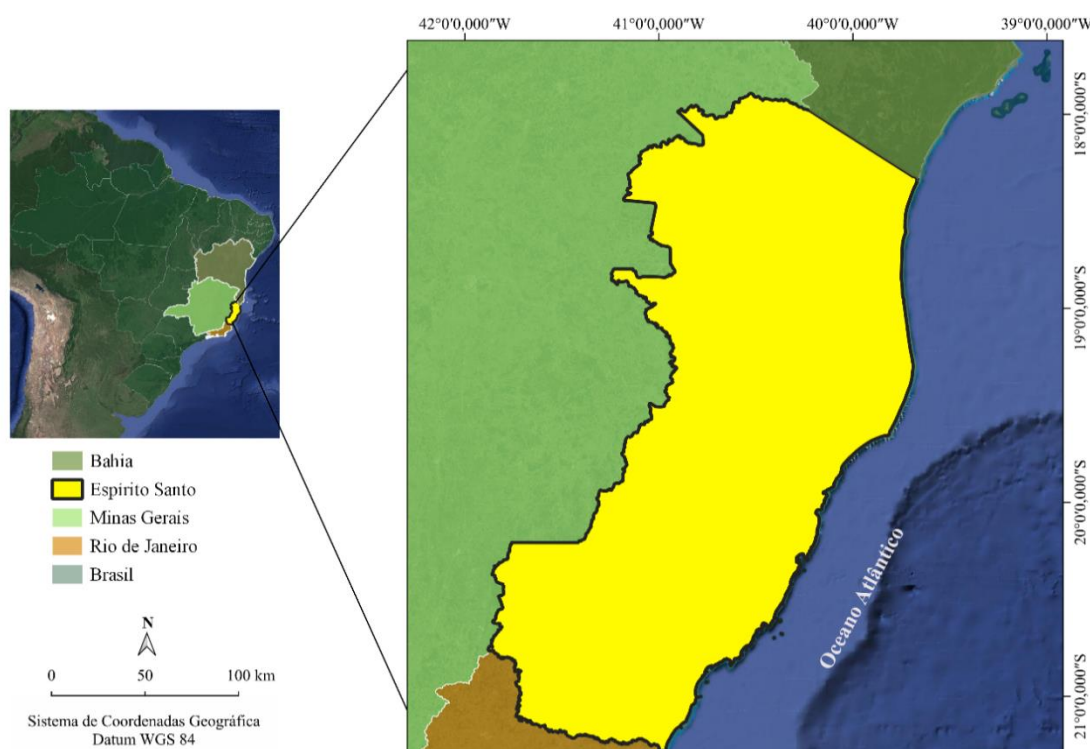
Ao incorporar a lógica fuzzy nos modelos de avaliação ambiental, é possível obter resultados mais realistas e representativos, contribuindo para uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos naturais. A abordagem para gestão é promissora pois permite estudos ambientais relacionados a conservação em áreas extensas (LIRA; FRANCISCO; FEIDEN, 2022).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende o estado do Espírito Santo, que está localizado na região sudeste do Brasil, entre os paralelos 17°53'29" e 21°18'03" de latitude Sul e os meridianos 39°41'18" e 41°52'45" de longitude Oeste de Greenwich e uma extensão territorial de 46.074.448 km² (IBGE, 2022). Este Estado é banhado pelo Oceano Atlântico, exibindo uma faixa litorânea com cerca de 400 km. Além disso, o Estado do Espírito Santo faz divisa ao Norte com o estado da Bahia, a Oeste com o estado de Minas Gerais e ao Sul com o estado do Rio de Janeiro (Figura 1).

Figura 1- Espírito Santo, Brasil



Fonte: a autora.

Inserido no Bioma Mata Atlântica, o Estado do Espírito Santo apresenta cinco tipos de vegetação em seu território a Floresta Ombrófila Densa, Floresta

Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Semidecidual, Formações Pioneiras e Refúgios Ecológicos (IBGE, 2023b).

O Estado possui o clima tropical úmido e abrange as duas zonas climáticas “A” e “C” da classificação de Köppen, “Aw” (clima de savana) clima tropical com estação seca de Inverno, “Am” clima de monção, apresenta um mês mais seco, “Cf” “clima temperado húmido sem estação seca e “Cw” clima temperado húmido com Inverno seco (SEKI et al., 2021) . A temperatura média entre 22 °C e 24°C, com volumes de precipitação de 1.400 mm por ano, e concentradas no verão (ESPIRÍTO SANTO, 2023).

4.2 ETAPAS METODOLÓGICAS PARA VULNERABILIDADE AMBIENTAL

A abordagem metodológica foi composta por cinco etapas (Figura 2) com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade ambiental da vegetação no bioma Mata Atlântica no Estado do Espírito Santo. As etapas aplicadas forneceram uma estrutura robusta para a análise, visando compreender os fatores que influenciariam a resiliência e a sensibilidade da vegetação diante das pressões ambientais.

Etapas 01: Definição das variáveis de vulnerabilidade ambiental e aquisição da base de dados;

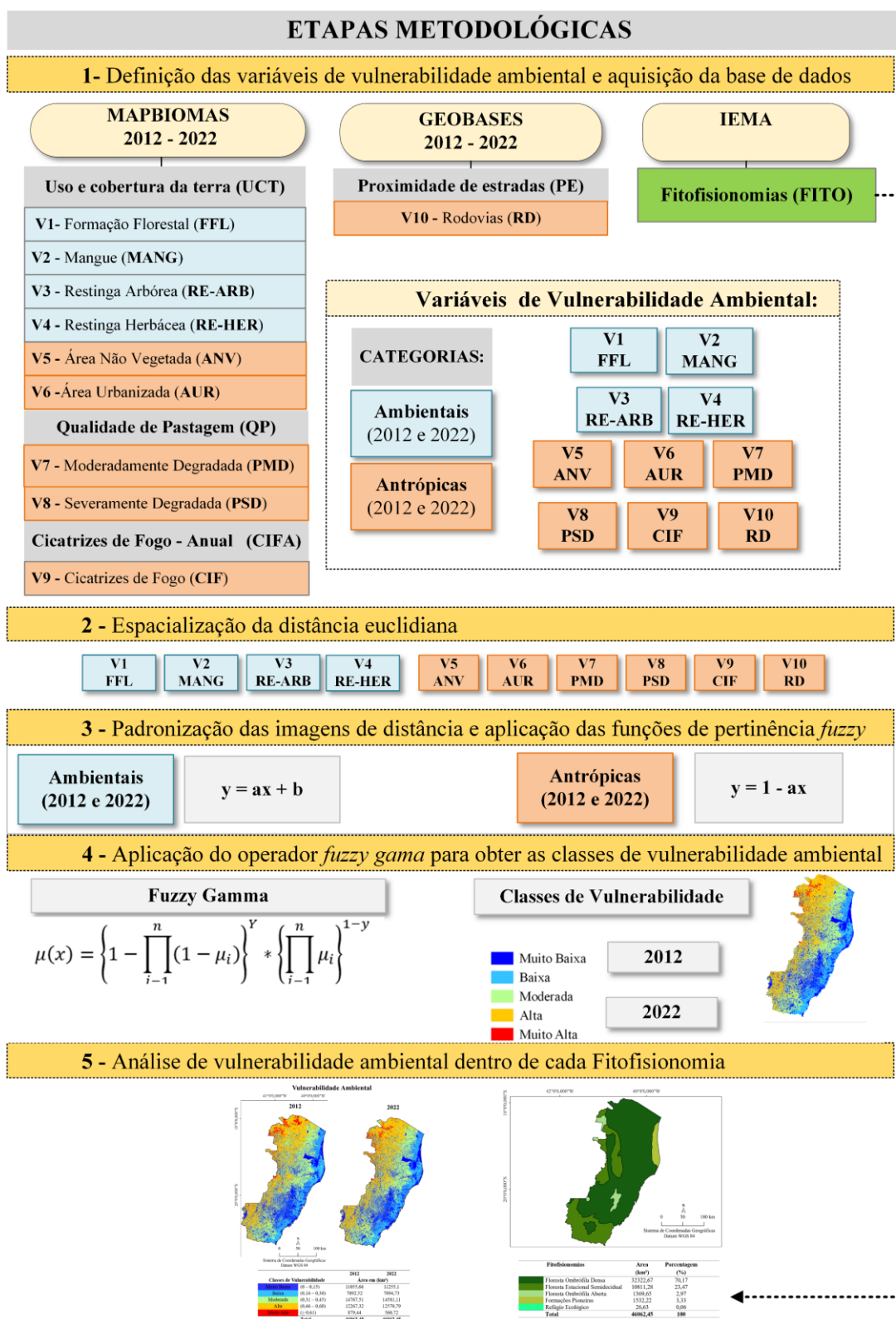
Etapas 02: Espacialização da distância euclidiana;

Etapas 03: Padronização das imagens de distância e aplicação das funções de pertinência *fuzzy*;

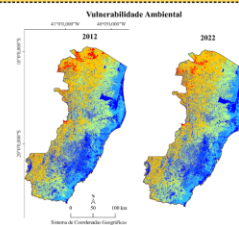
Etapas 04: Aplicação do operador *fuzzy gama* para obter as classes de vulnerabilidade ambiental;

Etapas 05: Análise de vulnerabilidade ambiental dentro de cada Fitofisionomia.

Figura 2 - Fluxograma metodológico contendo as etapas para mapeamento da vulnerabilidade ambiental da vegetação



Vulnerabilidade Ambiental



Classes de Vulnerabilidade	2012	2022
Muito Baixa	10891,66	12701,1
Baixa	7862,22	7869,73
Moderada	14767,51	14911,11
Alta	12701,21	12701,29
Muito Alta	476,44	566,77
Total	46922,45	46922,45

Fitofisionomias



Fitofisionomias	Área (km²)	Porcentagem (%)
Fitofisionomia Densa	13122,47	28,17
Fitofisionomia Semidensa	10811,28	23,24
Fitofisionomia Aberta	13801,65	29,62
Formações Planícies	1352,22	2,88
Refúgio Ecológico	264,53	0,56
Total	46922,45	100

Fonte: a autora.

4.2.1 Etapa 01- Definição das variáveis de vulnerabilidade ambiental e aquisição da base de dados

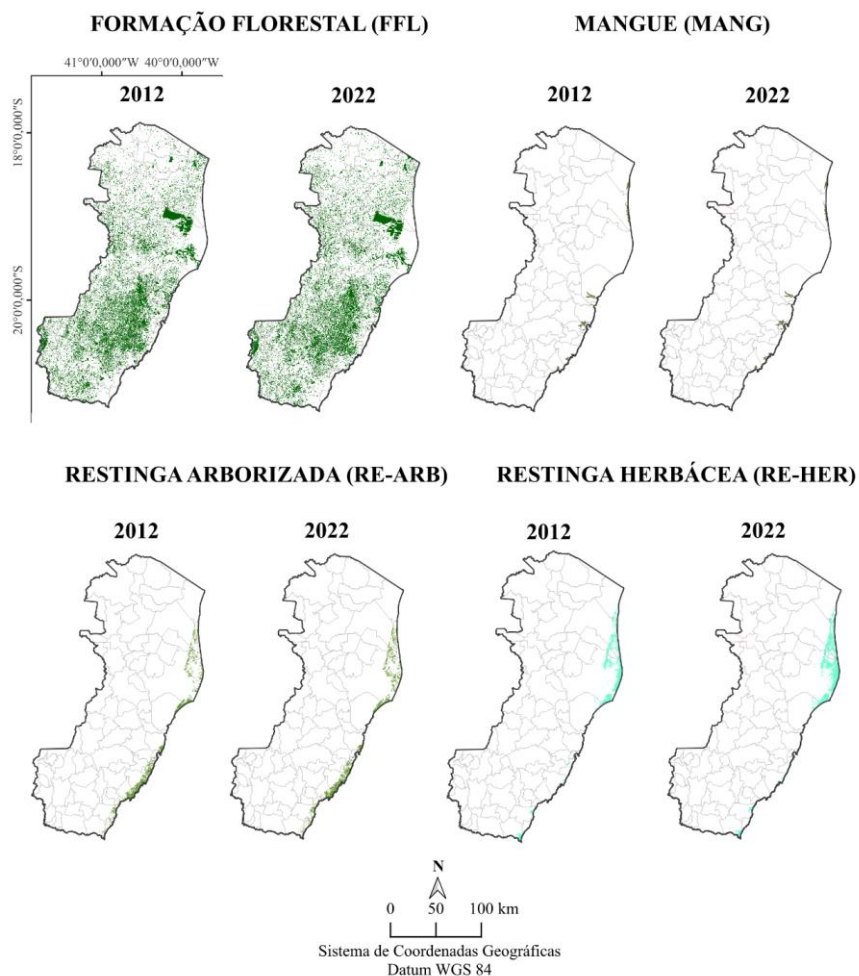
A partir da revisão bibliográfica sobre “vulnerabilidade ambiental” (CAVALCANTE *et al.*, 2010; PENHA; FONSECA; KORTING, 2017 PAUTZ *et al.*, 2023), identificou-se dez variáveis essenciais para avaliar a vulnerabilidade ambiental da vegetação no Espírito Santo. As variáveis foram categorizadas em dois grupos principais: fatores ambientais e antropogênicos, posteriormente selecionadas para os anos de 2012 e 2022. A escolha destes anos relaciona-se a melhor comparação dos resultados após um período de 10 anos da implementação do código florestal vigente, a Lei 12.651/2012 (BRASIL, 2012b). Para o processamento e análise detalhada destes dados e nas demais etapas metodológicas, foi utilizado o aplicativo computacional QGIS, versão 3.28.10 Firenze, software livre e multiplataforma do Sistema de Informação Geográfica (QGIS, 2023).

Variáveis ambientais

Para as variáveis ambientais, foram utilizados dados do Uso e Cobertura da Terra (UCT) do projeto MapBiomas Brasil para os anos de 2012 e 2022, da coleção 8. O MapBiomas disponibiliza imagens matriciais advindas da classificação supervisionada método de que se baseia em árvores de decisão, algoritmo *Random Forest* (MAPBIOMAS, 2023a).

A imagem matricial representativa do UCT foi vetorizada no QGIS, por meio da função “Raster para Vetor”. Após essa etapa, o vetor de UCT, teve sua geometria corrigida. Posteriormente as classes V1 - Formação Florestal (FFL), V2 - Mangue (MANG), V3 - Restinga Arborizada (RE-ARB), V4 - Restinga Herbácea (RE-HER) foram separadas para etapas de processamento de dados (Figura 3).

Figura 3 - Variáveis ambientais 2012 e 2022: Formação Florestal (FFL), Mangue (MANG), Restinga Arborizada (RE-ARB) e Restinga Herbácea (RE-HER)



Fonte: a autora.

Variáveis antrópicas

Na análise de vulnerabilidade ambiental para os anos de 2012 e 2022, foram selecionadas seis variáveis antrópicas, das quais cinco foram obtidas do projeto MapBiomas (Figura 4). Dessas, duas de origem do UCT, Área Não Vegetada (ANV) e Área Urbanizada (AUR), duas da qualidade da pastagem, Pastagem Moderadamente Degradada (PMD) e Pastagem Severamente Degradada (PSD) e, finalmente, uma do banco de dados de Cicatrizes de Fogo (CIF).

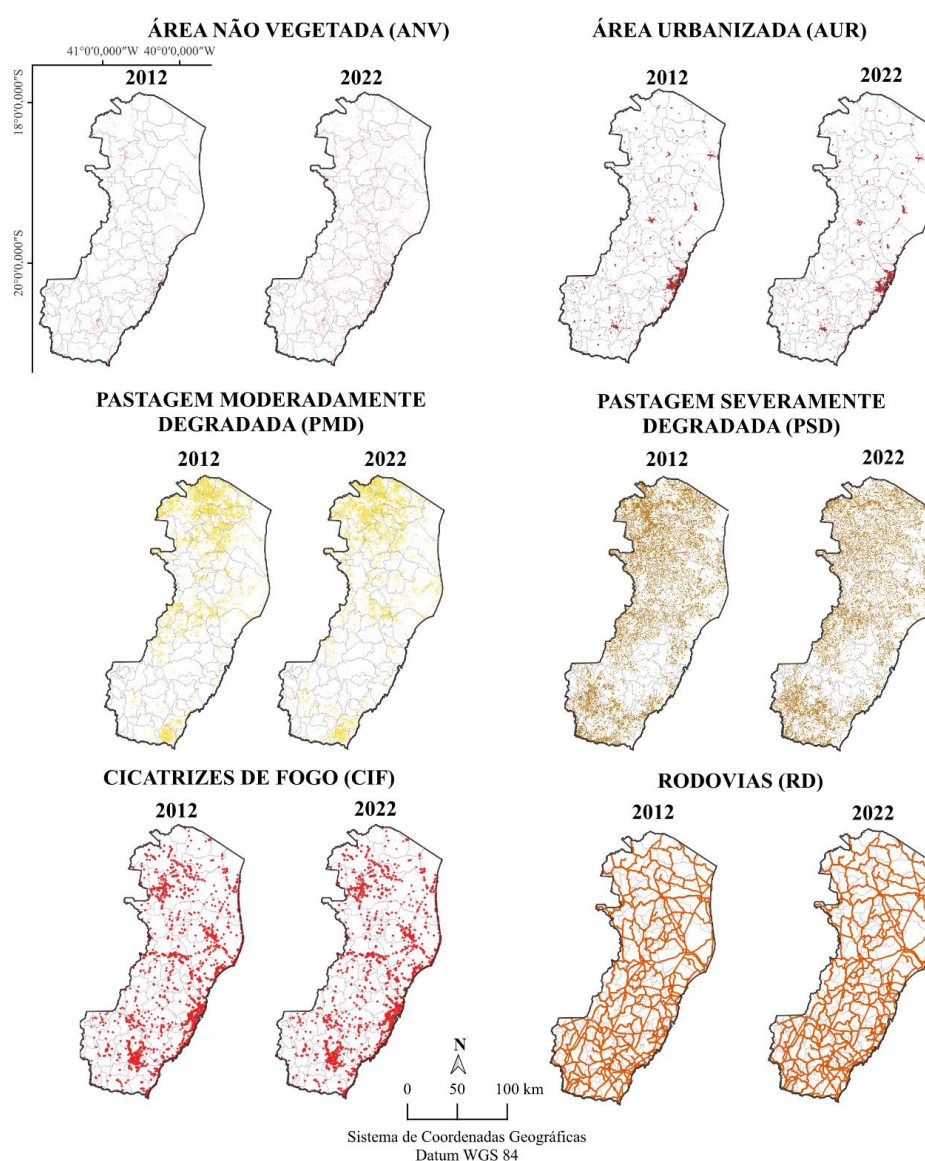
Para avaliar a vulnerabilidade ambiental da variável Pastagem (P), o estudo incorporou as categorias de Qualidade de Pastagem (QP). Utilizou-se imagens matriciais que ilustram a qualidade das pastagens nos anos de 2012 e 2022, obtidas através do projeto MapBiomas, especificamente da Coleção 3 Qualidade de Pastagem, via plataforma *Earth Engine* (GEE) com o *toolkit* do Google (MAPBIOMAS, 2023c). Esses dados cobrem o intervalo de 2000 a 2022 e as classificações das pastagens são determinadas por um algoritmo baseado no vigor vegetativo, delineando três níveis de degradação (Moderada, Severa e sem sinais de degradação). Para os propósitos deste estudo, foram selecionadas duas categorias específicas dessa coleção, como indicadores de qualidade de pastagem, a saber: Pastagem Moderadamente Degradada (PMD) e Pastagem Severamente Degradada (PSD). Partindo do pressuposto de que estas duas categorias apresentariam maior risco de vulnerabilidade ambiental dentre as três.

Em relação a variável Cicatrizes de Fogo (CIF) utilizada neste estudo, obteve-se os dados de cicatrizes de fogo anual (CIFA) provenientes do MapBiomas Fogo – Coleção 2, os dados são obtidos por meio da classificação automática de imagens do satélite LANDSAT (MAPBIOMAS, 2023b). As imagens matriciais de CIF para os anos de 2012 e 2022 foram adquiridas através de *scripts* na plataforma em nuvem do *Google Earth Engine* (GEE) específicos para o Estado do Espírito Santo (GOOGLE EARTH ENGINE - GEE, 2023). Dessa forma, V9 - CIF foi considerada como uma variável antrópica para a análise de vulnerabilidade.

Por fim, para a análise do impacto negativo decorrente da Proximidade das Estradas (PE), foi utilizada a variável Rodovias (RD). Essa variável foi adquirida a partir do acervo online do Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo – GEOBASES (GEOBASES, 2022). Os dados vetoriais referentes à malha viária do Estado foram obtidos a partir do aplicativo computacional QGIS, por meio da função de geoserviços de mapas online denominadas *Web Feature Service* (WFS). Essa função permite a conexão com as informações disponibilizadas por essas camadas, que podem ser visualizadas e exportadas posteriormente.

Dessa forma, os arquivos das rodovias federais do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e das rodovias estaduais do Departamento de Edificações e de Rodovias do Espírito Santo (DER) foram importados e unidos como uma única camada vetorial, resultando na última variável antrópica (V10), intitulada Rodovias (RD). Na Figura 4 são apresentadas as variáveis antrópicas, para os anos de 2012 e 2022.

Figura 4 - Variáveis antrópicas 2012 e 2022: Área Não Vegetada (ANV), Área Urbanizada (AUR), Pastagem Moderadamente Degradada (PMD), Pastagem Severamente Degradada (PSD), Cicatrizes de Fogo (CIF) e Rodovias (RD)



Fonte: a autora.

4.2.2 Etapa 02 – Espacialização da distância euclidiana

A distância euclidiana é a medida direta entre dois pontos, sendo frequentemente calculada com uso do teorema de Pitágoras. Nela pode-se calcular a distância entre dois pontos a e b representados em um espaço euclidiano n -dimensional (NETO, 2015). Dados dois pontos $(A1, B1)$ e $(A2, B2)$, a distância (d) entre eles, conforme a Equação (1):

$$d = \sqrt{(A2 - A1)^2 + (B2 - B1)^2} \quad (\text{Eq.1})$$

Foi aplicada a função “*r.grow.distance*” (distância euclidiana), do complemento *GRASS* no aplicativo computacional QGIS, às variáveis V1 - Formação Florestal (FFL), V2 - Mangue (MANG), V3 - Restinga Arborizada (RE-ARB), V4 - Restinga Herbácea (RE-HER), V5 - Área Não Vegetada (ANV), V6 - Área Urbanizada (AUR), V7 - Pastagem Modernamente Degradada (PMD), V8 - Pastagem Severamente Degradada (PSD), V9 - Cicatrizes de Fogo (CIF) e V10 - Rodovias (RD). Como resultado, foi gerada uma imagem matricial de proximidade contendo as distâncias em relação às feições mais próximas. Assim, quanto menor a distância de uma variável antrópica, fator de risco em análise, maior é a vulnerabilidade ambiental.

4.2.3 Etapa 03 – Padronização das imagens de distância e aplicação das funções de pertinência fuzzy

Todas as imagens matriciais de distância euclidiana foram reclassificadas e padronizadas. Nesse contexto, atribuiu-se o valor zero (0) para menores distâncias e o valor 1 para distâncias maiores para a vulnerabilidade ambiental.

Assim aplicou-se a função de pertinência *fuzzy* linear crescente definida por meio da Equação (2), para as quatro variáveis ambientais V1 - FFL, V2 - MANG, V3 - RE-ARB e V4 - RE-HER, (APÊNCIE A), admitindo que quanto mais próximas de 0 (menor distância) menor vulnerabilidade e se o valor próximo de 1 (maior distância) maior vulnerabilidade ambiental.

A função *fuzzy* linear decrescente, definida pela Equação (3), foi utilizada para as seis variáveis antrópicas V5 - ANV, V6 - AUR, V7 - PMD, V8 - PSD, V9 - CIF e V10 - RD (Apêndice B), admitindo que quanto mais próximas de 0 (menor distância) maior vulnerabilidade e se o valor próximo de 1 (maior distância) menor vulnerabilidade ambiental:

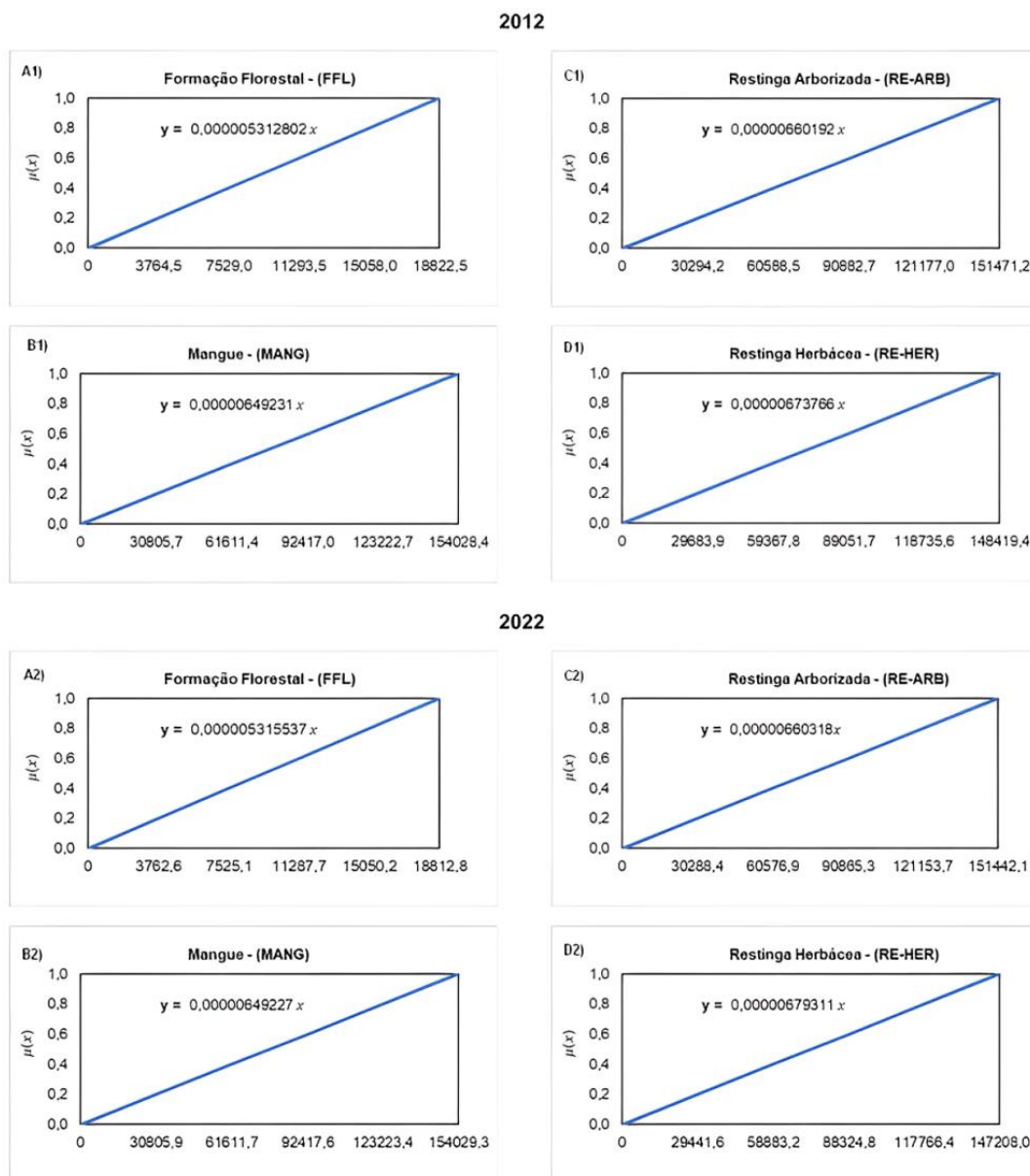
$$y = ax + b \quad (\text{Eq.2})$$

$$y = 1 - (ax) \quad (\text{Eq.3})$$

Em que y é a variável dependente (que está sendo prevista ou medida), x é a variável independente (variável que influencia y), a é o coeficiente angular (inclinação da linha) e b é a interceptação no eixo y (valor de y quando x é igual a zero).

Após a geração dos gráficos e formulação das funções de pertinência para cada variável (Figura 5 e Figura 6), no aplicativo QGIS, aplicou-se a função “fuzificação raster (associação linear)”. Isso resultou nas imagens matriciais fuzificadas das variáveis ambientais e antrópicas (Apêndices C e D). Posteriormente as imagens fuzificadas foram discretizada (reclassificadas) com base em seu valor máximo. Os intervalos estabelecidos foram: 0-|20; 0,21-|0,40; 0,41-| 0,60; 0,61|– 0,80 e $\geq 0,81$ (Figura 8 e 10).

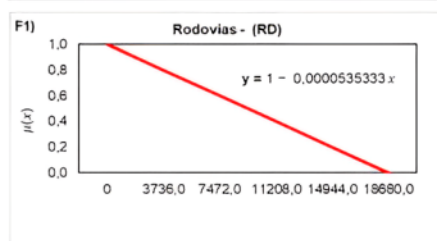
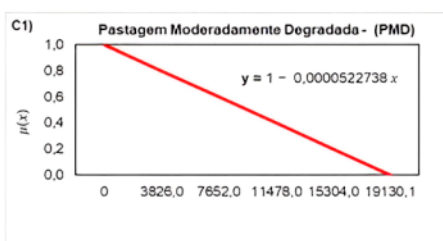
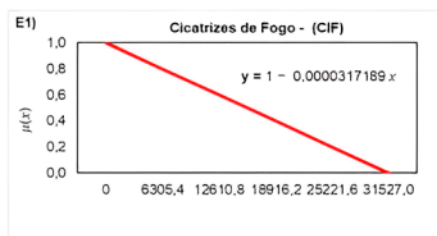
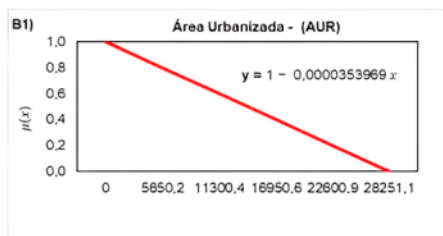
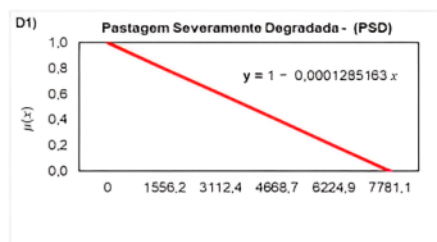
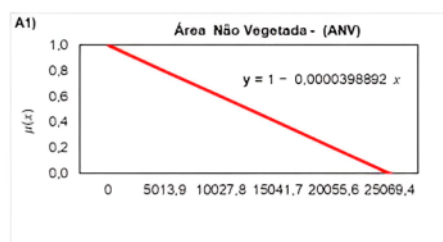
Figura 5 - Funções de pertinência aplicada a cada uma das variáveis ambientais: A1) Formação Florestal (FFL); B1) Mangue (MANG); C1) Restinga Arborizada (RE-ARB); D1) Restinga Herbácea (RE-HER)



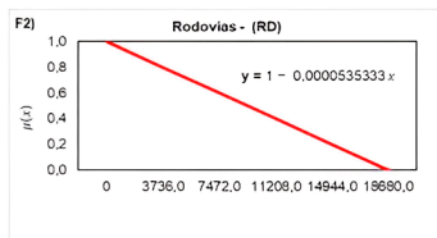
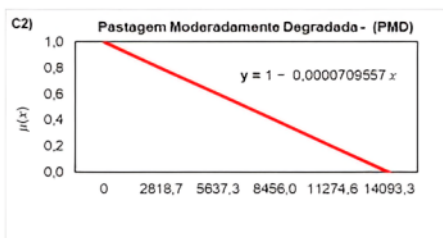
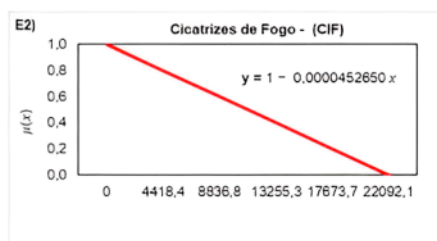
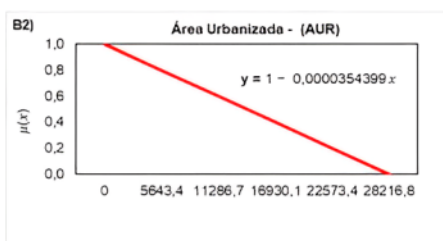
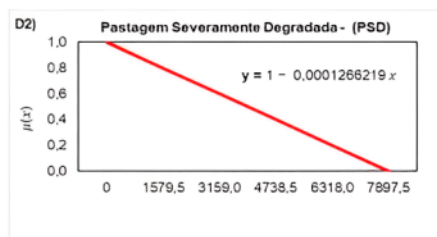
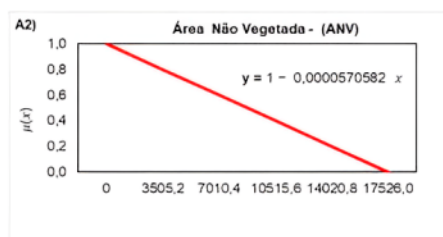
Fonte: a autora.

Figura 6 - Funções de pertinência aplicada a cada uma das variáveis antrópicas: A2) Área Não Vegetada (ANV); B2) Área Urbanizada (AUR); C2) Pastagem Moderadamente Degradada (PMD); D2) Pastagem Severamente Degradada (PSD); E2) Cicatrizes de Fogo (CIF); F2) Rodovias (RD)

2012



2022



Fonte: a autora.

4.2.4 Etapa 04 – Aplicação do operador *fuzzy gamma* para obter as classes de vulnerabilidade ambiental

O operador *Fuzzy Gamma*, é resultado do produto algébrico do *Fuzzy sum* e do produto *Fuzzy product*, ambos elevados a potência *gamma* (ESCADA, 1998). Nesse trabalho, utilizou-se o operador *Fuzzy Gamma* para obter o mapa contendo as classes de vulnerabilidade ambiental na área de estudo.

O operador Gamma é definido pela Equação (4).

$$\mu(x) = \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right\}^y * \left\{ \prod_{i=1}^n \mu_i \right\}^{1-y} \quad (\text{Eq.4})$$

Em que (μ_i) são os valores de associação difusa para $i = 1, 2, \dots, n$ é a camada de dados matricial, ou seja, o número de variáveis no estudo e y é o coeficiente (flexibilização) com valores entre 0 e 1.

O “*Fuzzy Gamma*” permite combinar o efeito crescente do “*Fuzzy Sum*” e o efeito decrescente do “*Fuzzy Product*” e não simplesmente retorna o valor de um único conjunto *Fuzzy*. O operador “*Fuzzy GAMMA*” foi aplicado por meio da função “calculadora raster” no QGIS assumindo ($y = 0,9$) Esta escolha baseou-se em estudos anteriores na mesma área, os quais indicaram que resultados mais otimizados foram obtidos em cenários menos restritivos e mais próximos da realidade do fenômeno em estudo (PENHA; FONSECA; KORTING, 2017).

Análise de vulnerabilidade ambiental dentro de cada Fitofisionomia:

Após a aplicação do operador “*Fuzzy Gamma*”, a imagem matricial contínua da vulnerabilidade ambiental da vegetação foi discretizada (reclassificada) com base em seu valor máximo. As classificações de vulnerabilidade e os intervalos estabelecidos foram: Muito Baixa (0-|0,15); Baixa (0,16-|0,30); Moderada (0,31-|0,45); Alta (0,46-|0,60) e Muito Alta ($\geq 0,61$) (Quadro 1).

Quadro 1 – Classes de vulnerabilidade ambiental da vegetação no bioma mata Atlântica, Espírito Santo Brasil

Intervalo	Classe	Classificação	Legenda
0- 0,15	1	Muito Baixa	
0,16- 0,30	2	Baixa	
0,31- 0,45	3	Moderada	
0,46- 0,60	4	Alta	
≥ 0,61	5	Muito Alta	

Fonte: a autora.

4.2.5 Etapa 05 – Análise de vulnerabilidade e confronto com as Fitofisionomias

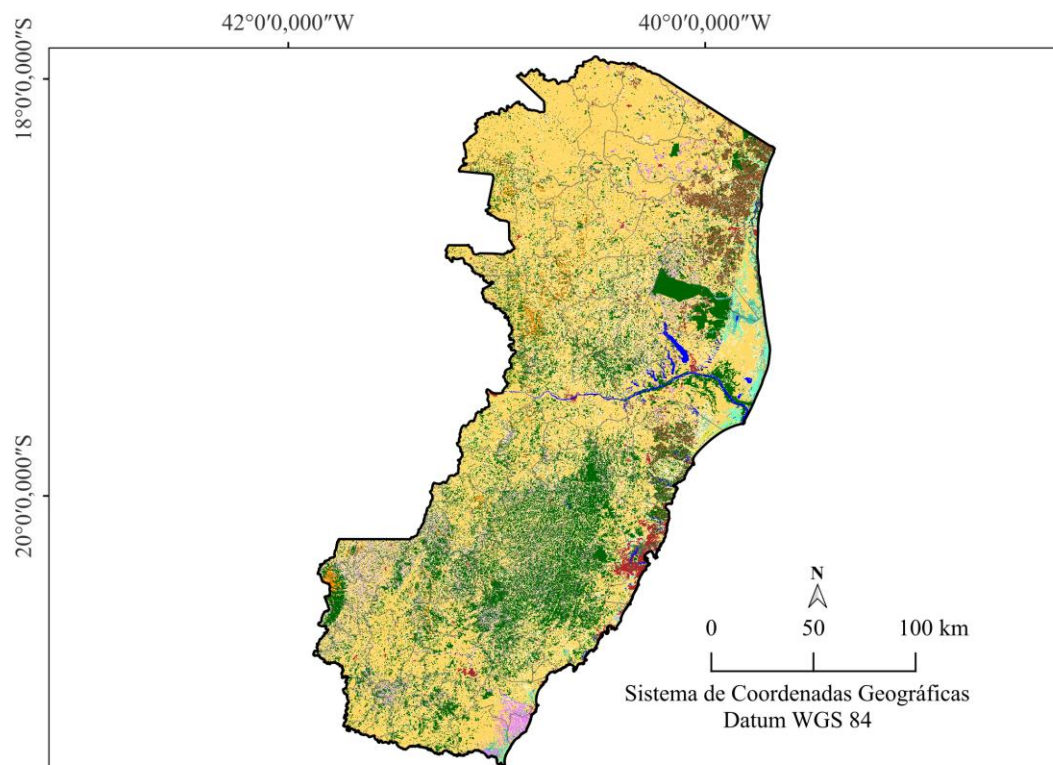
Para análise de vulnerabilidade ambiental e confronto com as fitofisionomias no Estado do Espírito Santo, foi obtido do Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) o arquivo vetorial com a distribuição das fitofisionomias presentes no estado (IEMA, 2023). Posteriormente, calculou-se o valor de área em km² para as cinco classes de vulnerabilidade ambiental (Muito Baixa, Baixa, Moderada, Alta e Muito Alta). A análise comparativa entre as fitofisionomias e as classes de vulnerabilidade possibilitou a identificação das fitofisionomias mais suscetíveis a impactos ambientais adversos.

5 RESULTADOS

5.1 USO E COBERTURA DA TERRA MAPBIOMAS 2012 E 2022

Os mapas de uso e cobertura da terra do bioma Mata Atlântica do estado do Espírito Santo são apresentados nas Figura 7 e Figura 8. Foram encontradas 21 classes de UCT para o estado do Espírito Santo.

Figura 7 – Classes de uso e cobertura da terra para o estado do Espírito Santo, para o ano de em 2012



Classe de UCT (2012)	Área (km ²)	Porcentagem (%)
Formação Florestal	9959,15	21,62
Formação Savânica	10,95	0,02
Mangue	74,23	0,16
Silvicultura	1623,75	3,53
Campo Alagado e Área Pantanosa	358,72	0,78
Outras Formações Não Florestais	9,58	0,02
Pastagem	21740,78	47,20
Cana	1,65	0,004
Mosaico de Usos	8385,59	18,20
Praia, Duna e Areal	54,58	0,12
Área Urbanizada	554,16	1,20
Outras Áreas Não Vegetadas	40,68	0,09
Afloramento Rochoso	623,19	1,35
Aquicultura	0,43	0,001
Apicum	3,17	0,01
Rio, Lago e Oceano	454,84	0,99
Outras Lavouras Temporárias	294,22	0,64
Café	1411,47	3,06
Outras Lavouras Perenes	23,75	0,05
Restinga Arborizada	189,21	0,41
Restinga Herbácea	248,33	0,54
Total	46062,45	100,00

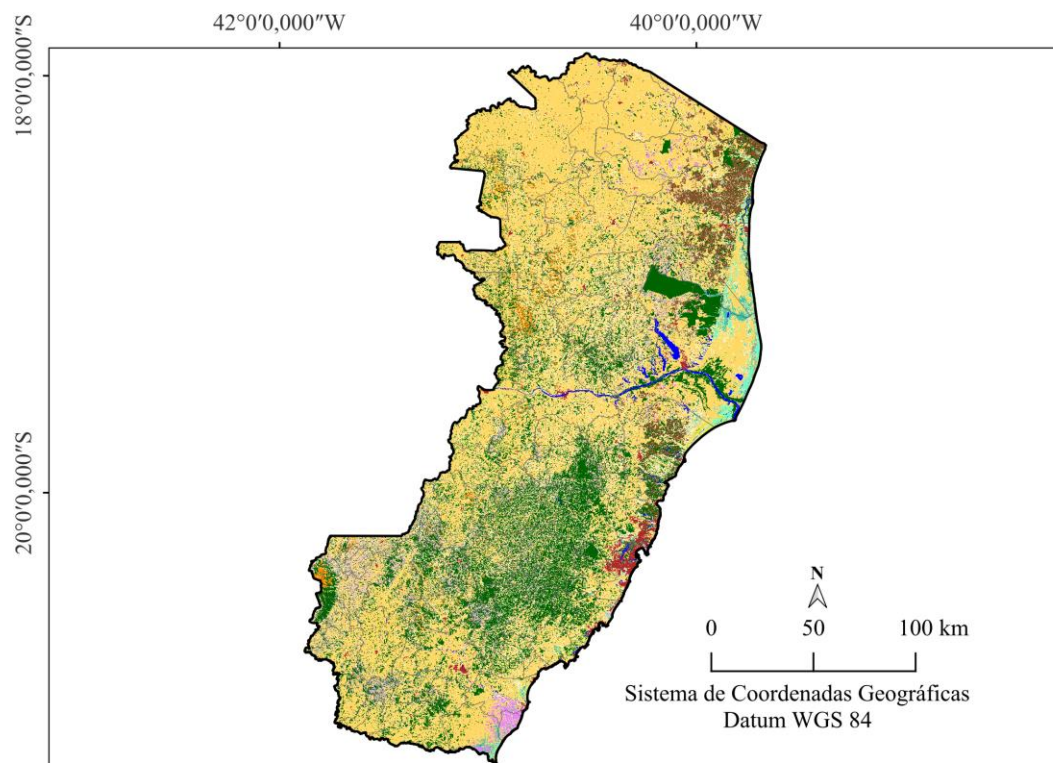
Fonte: a autora.

As classes de UCT com maior porcentagem em área em 2012 (Figura 7) são Pastagem (47,20%), Formação Florestal (21,62%), Mosaico de Usos (18,20 %). Já as menores são representadas por Aquicultura (0,001%), Cana (0,004%) e Apicum (0,01%).

Conforme os dados do MapBiomas no ano de 2012, para o estado do Espírito Santo, a soma das áreas de vegetação natural (Formação Florestal, Formação Savânica, Mangue, Restinga Arborizada e Restinga Herbácea) é de 10.481,87 km². Dentre essas classes, ao somarmos a área ocupada por Formação Florestal, Mangue, Restinga Arborizada e Restinga Herbácea, que constituem as variáveis ambientais de 2012, temos uma área total de 10.470,92 km², o que representa 22,73% do total de área do estado. Por outro lado, as variáveis antrópicas (Pastagem, Área Urbanizada e Área Não Vegetada) somam uma área de 22.335,62 km².

As classes de UCT com maior porcentagem em área em 2022 seguiram o padrão de 2012 (Figura 8). As maiores classes foram Pastagem (42,88%), Formação Florestal (21,74 %) e Mosaico de Usos (19,16 %). Já as classes que ocupam menores áreas são de Aquicultura (0,001 %), Apicum (0,01%) e Outras Formações Não Florestais (0,02 %).

Figura 8 – Classes de uso e cobertura da terra para o estado do Espírito Santo, para o ano de em 2022



Classe de UCT (2022)	Área (km ²)	Porcentagem (%)
Formação Florestal	10013,95	21,74
Formação Savânica	13,39	0,03
Mangue	69,66	0,15
Silvicultura	1807,91	3,92
Campo Alagado e Área Pantanosa	505,36	1,10
Outras Formações Não Florestais	10,93	0,02
Pastagem	19752,54	42,88
Cana	67,53	0,15
Mosaico de Usos	8826,16	19,16
Praia, Duna e Areal	41,06	0,09
Área Urbanizada	630,69	1,37
Outras Áreas Não Vegetadas	104,20	0,23
Afloramento Rochoso	649,60	1,41
Aquicultura	0,43	0,001
Apicum	3,13	0,01
Rio, Lago e Oceano	504,53	1,10
Outras Lavouras Temporárias	454,78	0,99
Café	2016,82	4,38
Outras Lavouras Perenes	88,76	0,19
Restinga Arborizada	196,75	0,43
Restinga Herbácea	304,26	0,66
Total	46062,45	100,00

Fonte: a autora.

Somando as áreas de vegetação natural (Formação Florestal, Mangue, Restinga Arborizada e Restinga Herbácea), no ano de 2022, do estado do Espírito Santo, tem-se uma área total de 10.584,62 km², o que representa 22,98% do total de área de UCT. As variáveis antrópicas (Pastagem, Área Urbanizada e Outras Áreas Não Vegetadas) somam uma área total de 20.487,43 km² no ano de 2022.

Ao comparar as 21 classes de UCT para os anos de 2012 e 2022, nota-se mudanças na distribuição dessas classes no Estado. Para o ano de 2022 verificou-se que a extensão da área de Formação Florestal apresentou um ganho de 54,8 km² em relação ao ano de 2012.

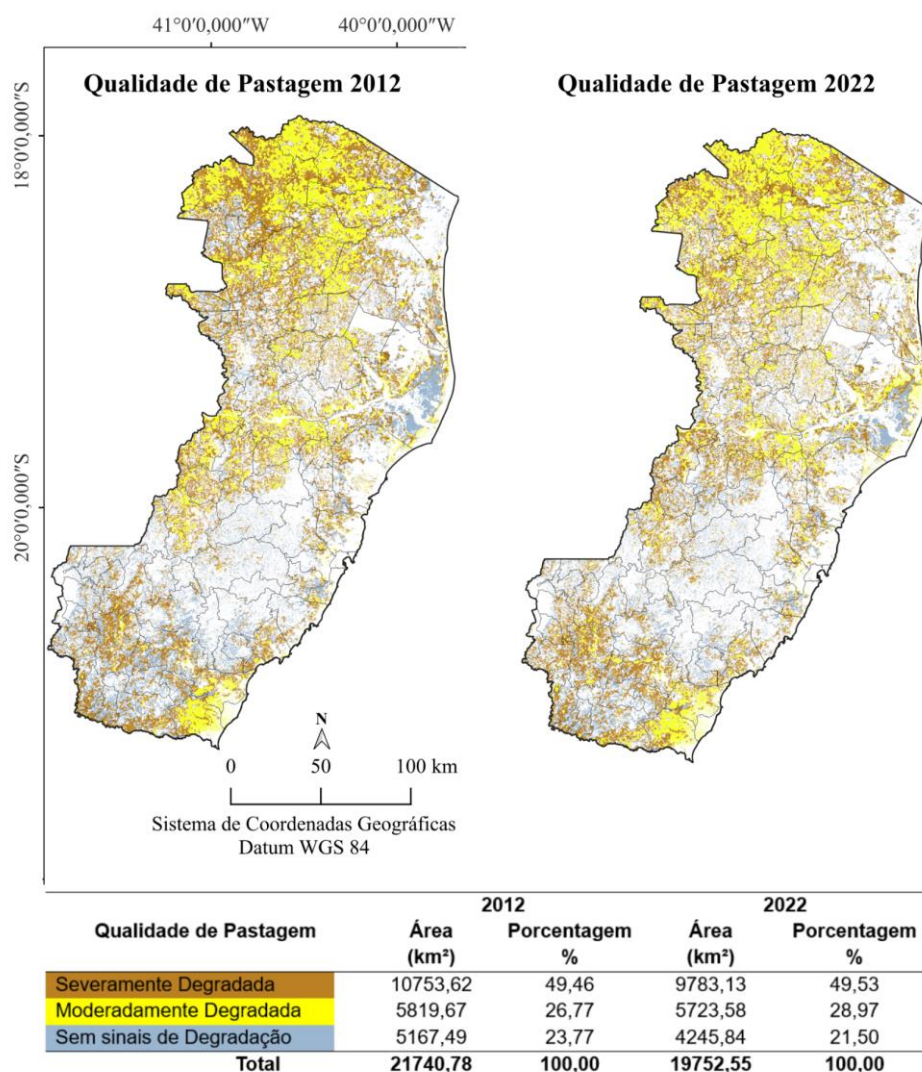
A área total de Pastagem no Estado reduziu de 47,20%, em 2012 (Figura 7), para 42,88% em 2022 (Figura 8), correspondendo a uma redução de 1.988,24 km².

A área destinada à Silvicultura teve um ganho de 184,16 km², sugere-se uma possível intensificação do cultivo de florestas plantadas no ano de 2022 em relação ao ano de 2012. Adicionalmente, a área de Café teve um incremento de 605,35 km². A área Urbanizada teve um aumento de 76,54 km² refletindo um crescimento das cidades do estado.

Notou-se ainda uma expansão da área de Mosaico de Usos em 440,57 km². A área de Outras Lavouras Perenes também apresentou um aumento de 65,01 km² no ano de 2022 em relação ao ano de 2012.

Ao analisarmos a classe de UCT referente a Pastagem e suas subdivisões, de acordo com o cenário de degradação que possuem, notamos que para o ano de 2012 a classe é composta de 21.740,78 km², valor que se subdivide nas três categorias que compõem a classe, a saber: V7 - Pastagem Modernamente Degradada (PMD), V8 - Pastagem Severamente Degradada (PSD) e Sem Sinais de Degradação (Figura 9).

Figura 9 - Valor de área em km² e percentagem para as categorias de pastagem, em relação ao estado de conservação.



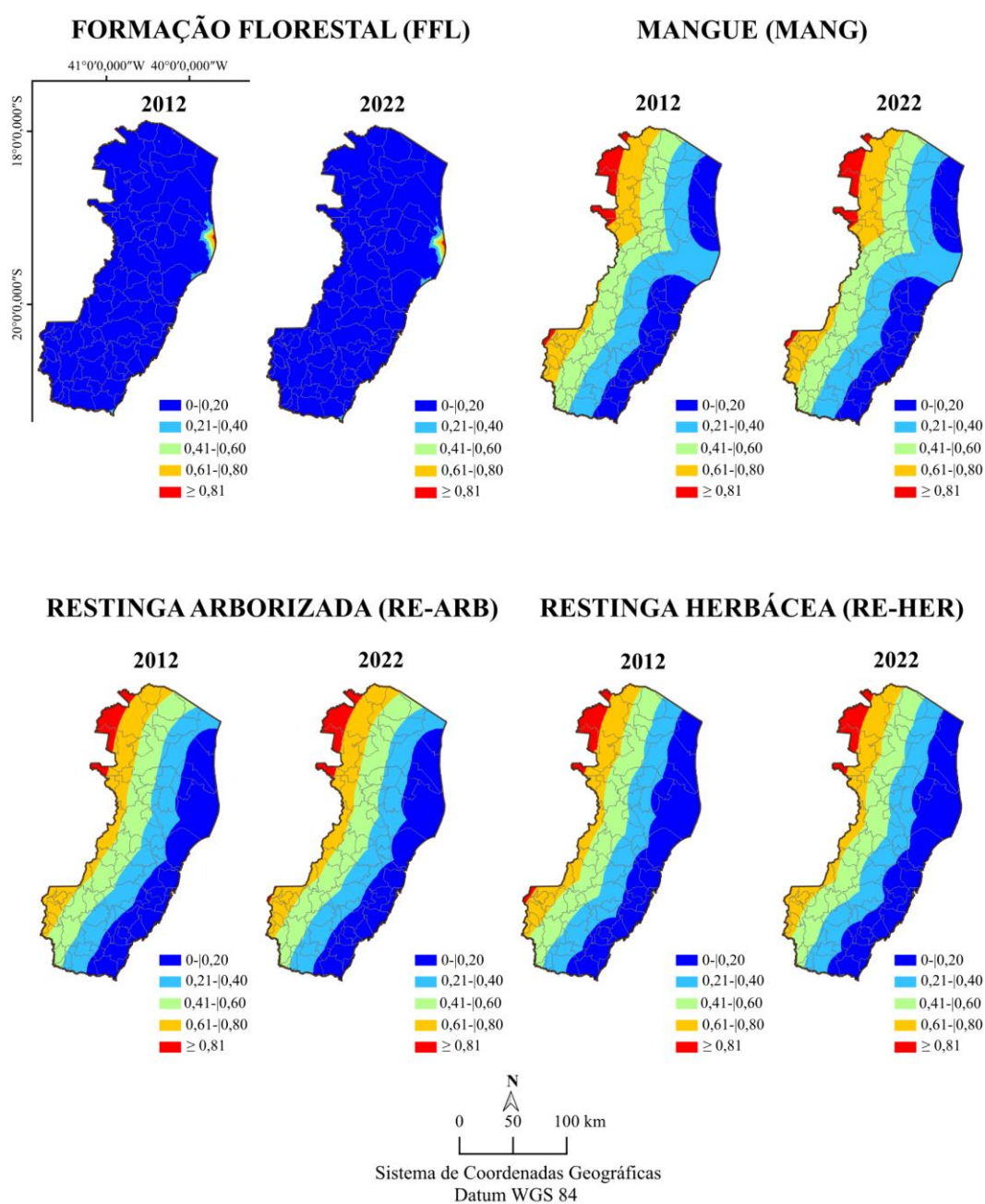
Fonte: a autora.

Nota-se que a maior parte das pastagens do estado encontram-se em estado severo e moderado de degradação. Em relação a classe de Pastagem Severamente Degradada nota-se que a área era de 10.753,62 km² em 2012 e reduziu para 9.783,13 km² em 2022. Tal tendência de redução também ocorre na classe de Pastagem Moderadamente Degradada, 5.819,67 km² em 2012 e 5.723,58 km² em 2022, e Sem Sinais de Degradação que variou de 5.167,49 km² para 4.245,84 km². O reflexo da redução da área de Pastagem total é visto nas classes de qualidade de Pastagem.

5.2 VARIÁVEIS FUZZIFICADAS

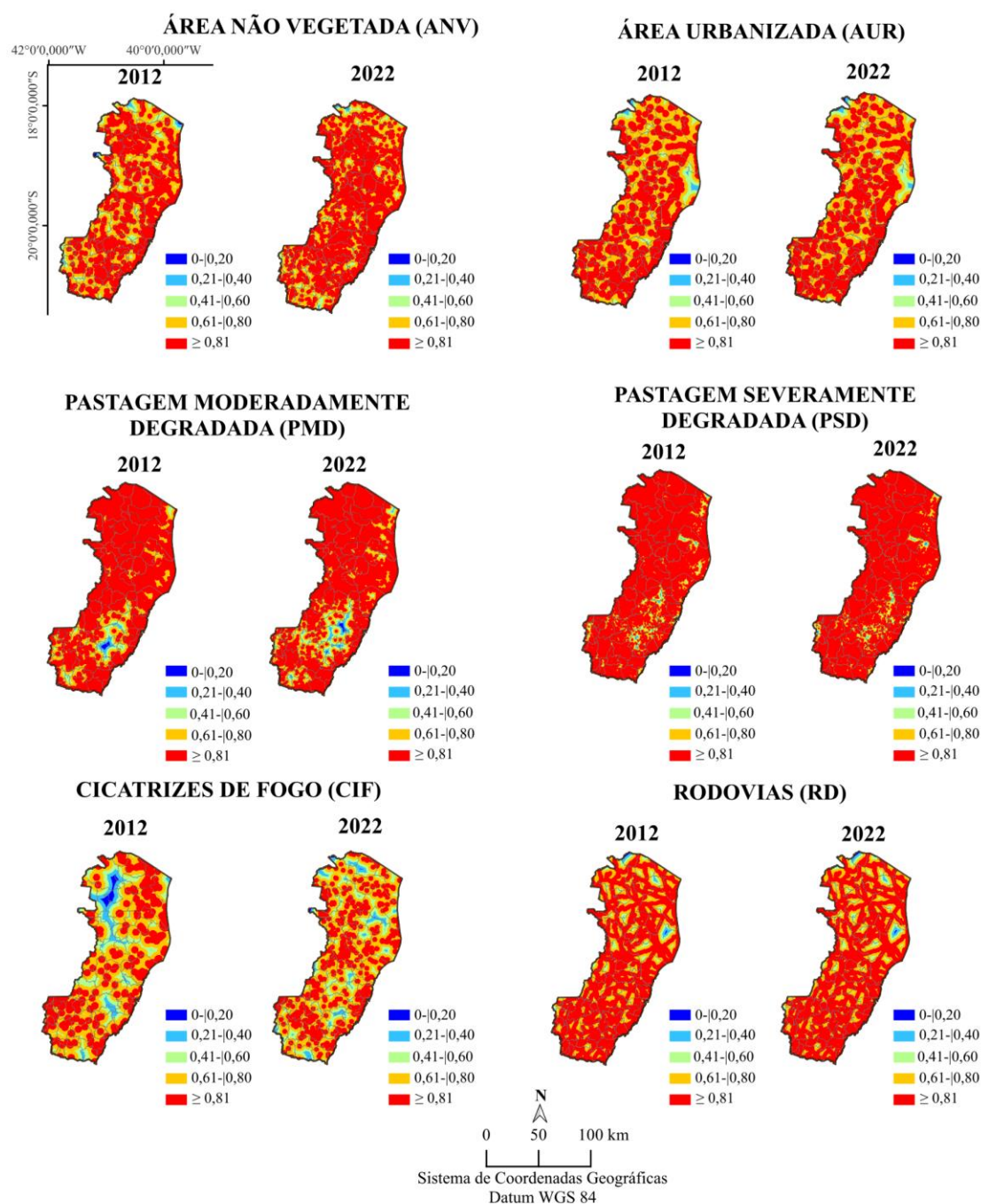
Os resultados da padronização para cada uma das variáveis ambientais e antrópicas, envolvidas no estudo, são apresentadas nas Figuras 10 e 11, respectivamente.

Figura 10 - Efeito das funções de pertinência sobre as variáveis ambientais



Fonte: a autora.

Figura 11 – Efeito das funções de pertinência sobre as variáveis antrópicas



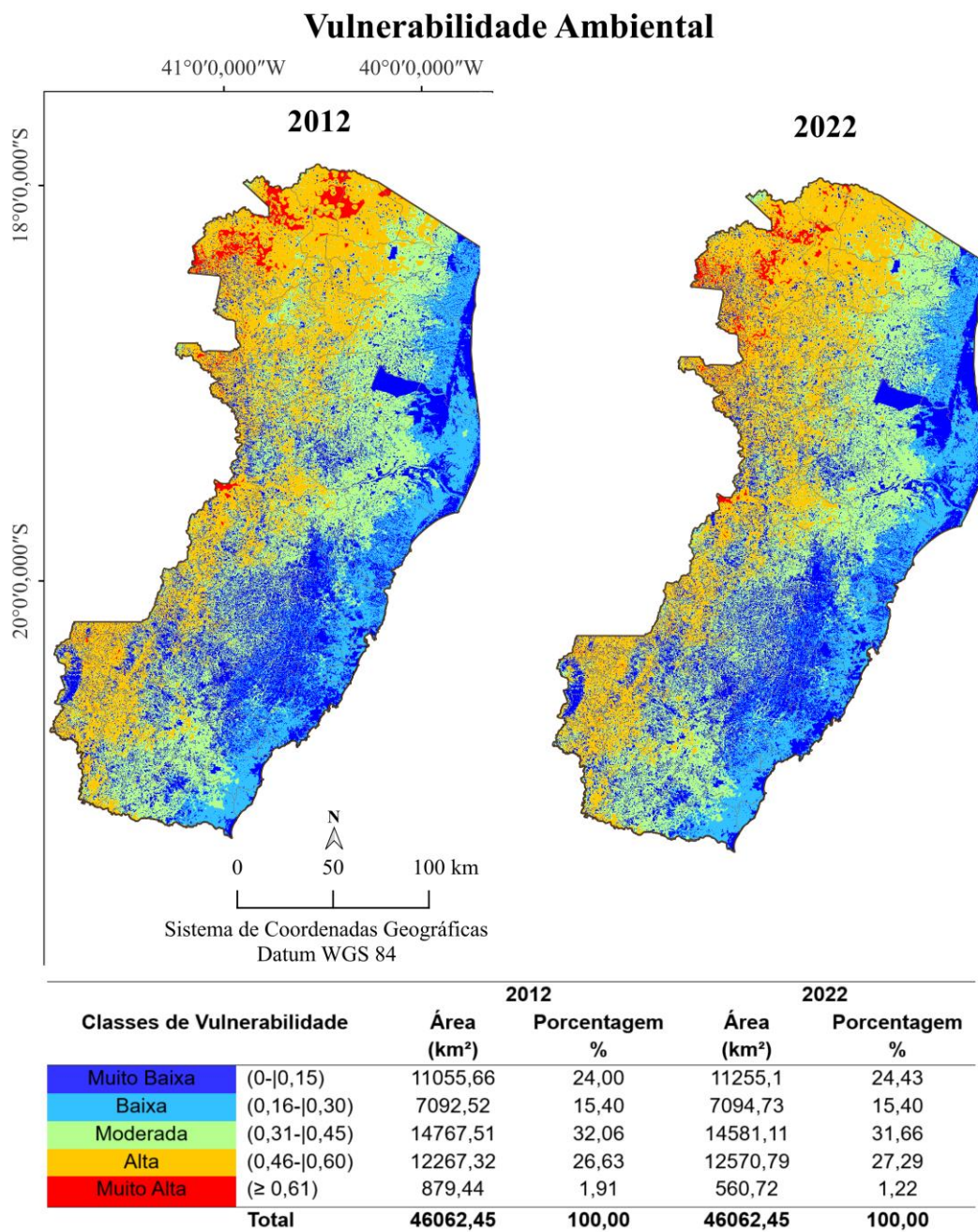
Fonte: a autora.

5.3 VULNERABILIDADE AMBIENTAL

As variações entre as classes de vulnerabilidade ambiental podem ser observadas na Figura 12, em que as classes: Muito Baixa, Baixa, Moderada, Alta

e Muito Alta, apresentaram flutuações em suas áreas de ocorrência entre 2012 e 2022. A maior parte do território do Estado foi classificado, com base na metodologia utilizada neste estudo, como vulnerabilidade ambiental Moderada e Alta.

Figura 12 – Vulnerabilidade ambiental da vegetação no Bioma Mata Atlântica para o estado do Espírito Santo



Fonte: a autora.

As classes Muito Alta e Alta estão mais concentradas nas regiões norte e noroeste do estado, que correspondem aos municípios de Mucuri, Ponto Belo, Montanha, Pedro Canário, Conceição da Barra, Boa Esperança, São Mateus, Jaguaré, Ecoporanga, Água Doce do Norte, Barra de São Francisco, Vila Pavão, Nova Venécia, Mantenópolis e Águia Branca (SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO - SEDES, 2023) .

No entanto, a classe Muito Alta, reduziu de 879,44 km², em 2012, para 560,72 km² em 2022 (Figura 12), resultado que pode ser atrelado a mudanças nas práticas de uso e cobertura da terra, implementação de medidas de conservação ambiental ou políticas públicas, como o código florestal podem influenciar as variações observadas.

A classe de vulnerabilidade Moderada obteve uma redução de área de 186,4 km² em 2022, comparando ao ano de 2012. No entanto, a classe Alta vulnerabilidade apresentou um aumento de área de 303,47 km².

A classe Baixa manteve-se estável ao longo do tempo, indicando uma possível estabilidade nas condições ambientais dessas áreas. A Classe Muito Baixa, teve um aumento de 199,44 km² de área em 2022 quando comparado a 2012.

5.4 CLASSES DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL DENTRO DO USO E COBERTURA DA TERRA

As tabelas 1 e 2 apresentam dados sobre a distribuição das áreas de UCT em cada classe de vulnerabilidade ambiental para os anos de 2012 e 2022.

Tabela 1 - Valores de área em km² para as classes de UCT dentro das classes de vulnerabilidade ambiental.

Classes de vulnerabilidade ambiental										
Ano	Muito Alta		Alta		Moderada		Baixa		Muito Baixa	
	2012	2022	2012	2022	2012	2022	2012	2022	2012	2022
Classes UCT	Área km ²		Área km ²		Área km ²		Área km ²		Área km ²	
FFL	0,091	-	11,575	21,193	360,011	378,806	186,615	182,312	9400,500	9431,844
FS	0,267	0,274	6,280	5,982	4,262	6,600	-	-	0,470	0,723
MANG	-	-	-	-	-	-	0,430	0,371	73,965	69,358
SVL	7,529	5,889	125,721	230,511	616,164	702,907	833,014	830,060	41,755	38,101
CAAP	0,166	0,577	0,470	10,665	6,624	22,748	262,230	351,894	89,918	119,589
OFF	0,188	0,087	0,441	0,804	1,382	2,068	7,330	7,549	0,833	0,832
PT	808,083	497,139	9869,868	9263,830	7888,755	6901,946	2900,891	2776,139	270,651	312,742
CN	-	0,250	0,403	15,272	1,259	45,558	0,381	6,728	-	0,100
MU	35,195	30,641	1424,197	1810,003	4313,611	4396,311	2032,430	1982,276	579,337	606,301
PDA	-	-	-	-	-	-	35,961	26,596	17,770	13,897
AUR	15,159	12,038	77,606	95,456	98,880	120,007	311,976	351,004	50,622	52,040
OANV	0,946	1,220	8,537	27,345	10,780	31,870	11,897	31,671	8,702	12,031
AFR	3,247	4,416	275,601	343,257	311,766	267,630	17,182	17,969	15,800	16,762
AQ	-	-	-	-	-	-	0,510	0,436	0,087	0,090
AP	-	-	-	-	0,129	-	1,278	1,212	2,049	2,011
RLO	3,801	3,029	67,663	78,558	216,895	236,307	130,596	146,445	34,832	39,059
OLT	2,141	2,391	40,757	85,571	68,768	188,595	179,383	171,388	3,729	7,215
CF	2,458	2,345	355,444	555,354	856,068	1234,053	162,541	184,220	35,400	41,663
OLP	0,166	0,424	2,758	26,987	12,159	45,711	7,472	13,376	1,760	2,658
REA-ARB	-	-	-	-	-	-	2,926	2,819	186,447	193,954
RE-HER	-	-	-	-	-	-	7,479	10,270	241,030	294,133
Total	879,440	560,720	12267,320	12570,790	14767,510	14581,110	7092,520	7094,730	11055,661	11255,100

Onde : FFL (Formação Florestal); FS (Formação Savânica); MANG (Mangue); SC (Silvicultura); CAAP (Campo Alagado e Área Pantanosa); OFF (Outras Formações Não Florestais); PT (Pastagem); Cana (CN); Mosaico de Usos (MU); PDA (Praia, Duna e Areal); AUR (Área Urbanizada); OANV (Outras Áreas Não Vegetadas); AFR (Afloramento Rochoso); AQ (Aquicultura); AP (Apicum); RLO (Rio, Lago e Oceano); OLT (Outras Lavouras Temporárias); CF (Café); OLP (Outras Lavouras Perenes); RE-ARB (Restinga Arborizada); (Restinga Herbácea) RE-HER.

Fonte: a autora.

Tabela 2 - Valores de área em km² para as classes de UCT dentro das classes de vulnerabilidade ambiental.

Classes de vulnerabilidade ambiental										
Ano	Muito Alta		Alta		Moderada		Baixa		Muito Baixa	
	2012	2022	2012	2022	2012	2022	2012	2022	2012	2022
Classes UCT	Área %		Área %		Área %		Área %		Área %	
FFL	0,010	-	0,094	0,169	2,438	2,598	2,631	2,570	85,029	83,801
FS	0,030	0,049	0,051	0,048	0,029	0,045	-	-	0,004	0,006
MANG	-	-	-	-	-	-	0,006	0,005	0,669	0,616
SVL	0,856	1,050	1,025	1,834	4,172	4,821	11,745	11,700	0,378	0,339
CAAP	0,019	0,103	0,004	0,085	0,045	0,156	3,697	4,960	0,813	1,063
OFF	0,021	0,015	0,004	0,006	0,009	0,014	0,103	0,106	0,008	0,007
PT	91,886	88,661	80,457	73,693	53,420	47,335	40,901	39,131	2,448	2,779
CN	-	0,045	0,003	0,121	0,009	0,312	0,005	0,095	-	0,001
MU	4,002	5,465	11,610	14,398	29,210	30,151	28,656	27,941	5,240	5,387
PDA	-	-	-	-	-	-	0,507	0,375	0,161	0,123
AUR	1,724	2,147	0,633	0,759	0,670	0,823	4,399	4,948	0,458	0,462
OANV	0,108	0,217	0,070	0,218	0,073	0,219	0,168	0,446	0,079	0,107
AFR	0,369	0,787	2,247	2,731	2,111	1,835	0,242	0,253	0,143	0,149
AQ	-	-	-	-	-	-	0,007	0,006	0,001	0,001
AP	-	-	-	-	0,001	-	0,018	0,017	0,019	0,018
RLO	0,432	0,540	0,552	0,625	1,469	1,621	1,841	2,064	0,315	0,347
OLT	0,243	0,426	0,332	0,681	0,466	1,293	2,529	2,416	0,034	0,064
CF	0,280	0,418	2,897	4,418	5,797	8,463	2,292	2,597	0,320	0,370
OLP	0,019	0,076	0,022	0,215	0,082	0,313	0,105	0,189	0,016	0,024
REA-ARB	-	-	-	-	-	-	0,041	0,040	1,686	1,723
RE-HER	-	-	-	-	-	-	0,105	0,142	2,180	2,613
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Onde : FFL (Formação Florestal); FS (Formação Savânica); MANG (Mangue); SC (Silvicultura); CAAP (Campo Alagado e Área Pantanosa); OFF (Outras Formações Não Florestais); PT (Pastagem); Cana (CN); Mosaico de Usos (MU); PDA (Praia, Duna e Areal); AUR (Área Urbanizada); OANV (Outras Áreas Não Vegetadas); AFR (Afloramento Rochoso); AQ (Aquicultura); AP (Apicum); RLO (Rio, Lago e Oceano); OLT (Outras Lavouras Temporárias); CF (Café); OLP (Outras Lavouras Perenes); RE-ARB (Restinga Arborizada); (Restinga Herbácea) RE-HER.

Fonte: a autora.

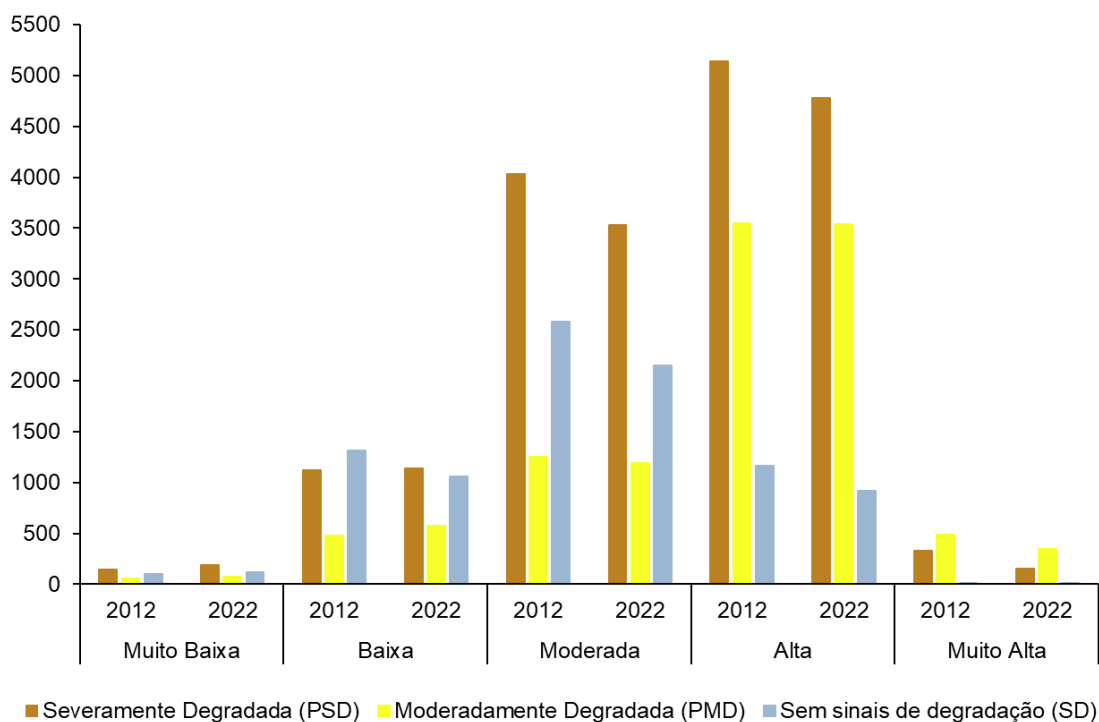
As classes de UCT referentes ao ano de 2012 com maiores porcentagens de área dentro da classe Muito Alta vulnerabilidade são Pastagem com 91,89%, seguido de Mosaico de Usos com 4% e Área Urbanizada com 1,72%. Para o ano de 2022, em relação a classe de Muito Alta vulnerabilidade, tem-se Pastagem com 88,66%, Mosaico de Usos com 5,46% e Área Urbanizada 2,147%. Dentro da área de Muito Alta vulnerabilidade a classe de Pastagem se destacou em área, porém comparando os anos de 2012 e 2022, nota-se uma redução de 310,94 km².

Em relação a categoria de Alta vulnerabilidade nota-se que não houve alteração das classes que possuíram maior área de ocupação em relação aos dois anos, 2012 e 2022, destacando a Pastagem, Mosaicos de Uso e o Café. No entanto, obtivemos leves alterações de área ocupada, por essas classes, do ano de 2012 para o ano de 2022. A classe de Pastagem apresentou uma redução de área de 606,038 km². Por outro lado, a classe de Mosaico de Uso e de Café apresentaram um incremento de 385,806 km² e 199,91 km² respectivamente.

As classes de Pastagem, Mosaico de Usos e Café foram as com maior distribuição em área na categoria de vulnerabilidade Moderada. Ao analisarmos a classe de vulnerabilidade Baixa, nota-se que a classe de Pastagem, Mosaico de Usos e Silvicultura são as que possuem maior porcentagem de área ocupada. Por fim, a classe de Muito Baixa vulnerabilidade apresenta a maior parte da área ocupada por Formação Florestal.

Ao analisar as categorias de qualidade de pastagem dentro das classes de vulnerabilidade ambiental nota-se uma maior representatividade territorial da categoria Severamente Degradada com exceção da classe de Baixa vulnerabilidade no ano de 2012 e de Muito Alta vulnerabilidade para o ano de 2012 e 2022 (Figura 13).

Figura 13 – Categoria de qualidade das pastagens dentro das diferentes classes de vulnerabilidade em 2012 e 2022, no estado do Espírito Santo, Brasil

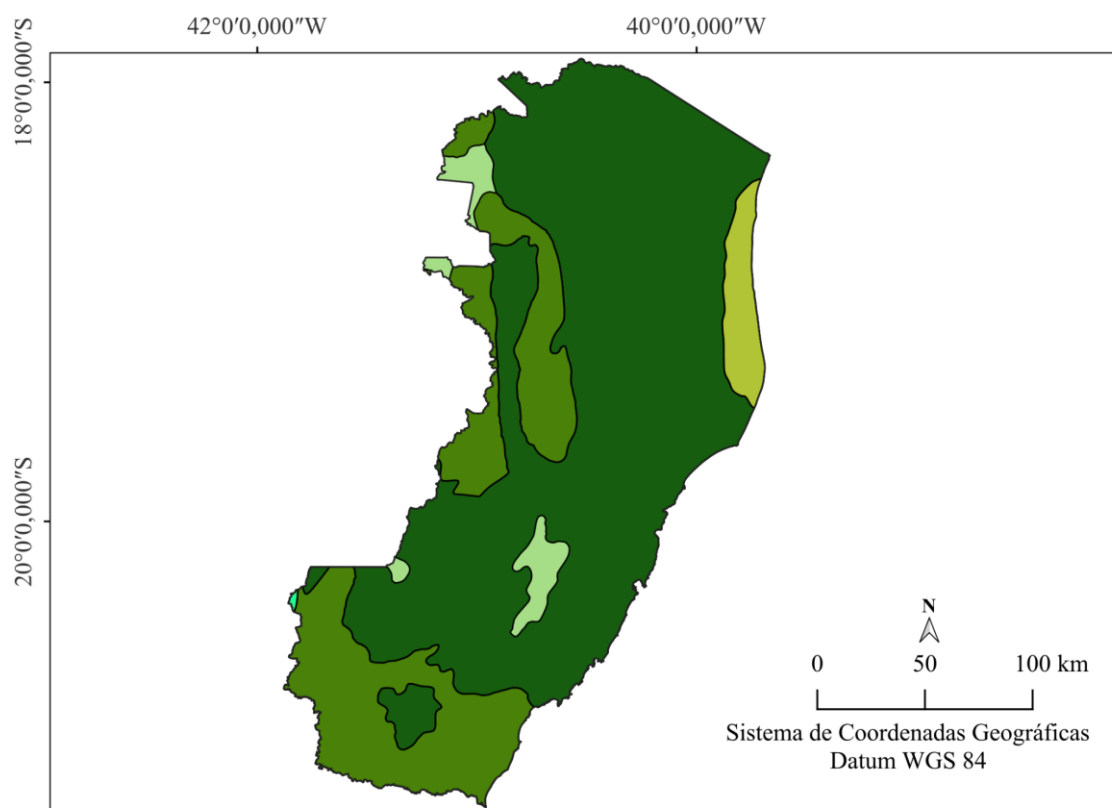


Fonte: a autora.

5.5 VULNERABILIDADE AMBIENTAL NAS FITOFISIONOMIAS DA VEGETAÇÃO DO BIOMA MATA ATLÂNTICA NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO.

A Figura 14 ilustra como as diversas fitofisionomias se distribuem pelo Bioma Mata Atlântica no estado do Espírito Santo, com base em dados do Instituto Estadual de Meio Ambiente (IEMA, 2023). Entre os principais tipos de vegetação, a Floresta Ombrófila Densa se destaca pela sua ampla presença no território estadual, seguida pela Floresta Estacional Semidecidual. Já a Figura 15 (Apêndice - E), detalha a área ocupada por cada fitofisionomia dentro das classes de vulnerabilidade ambiental.

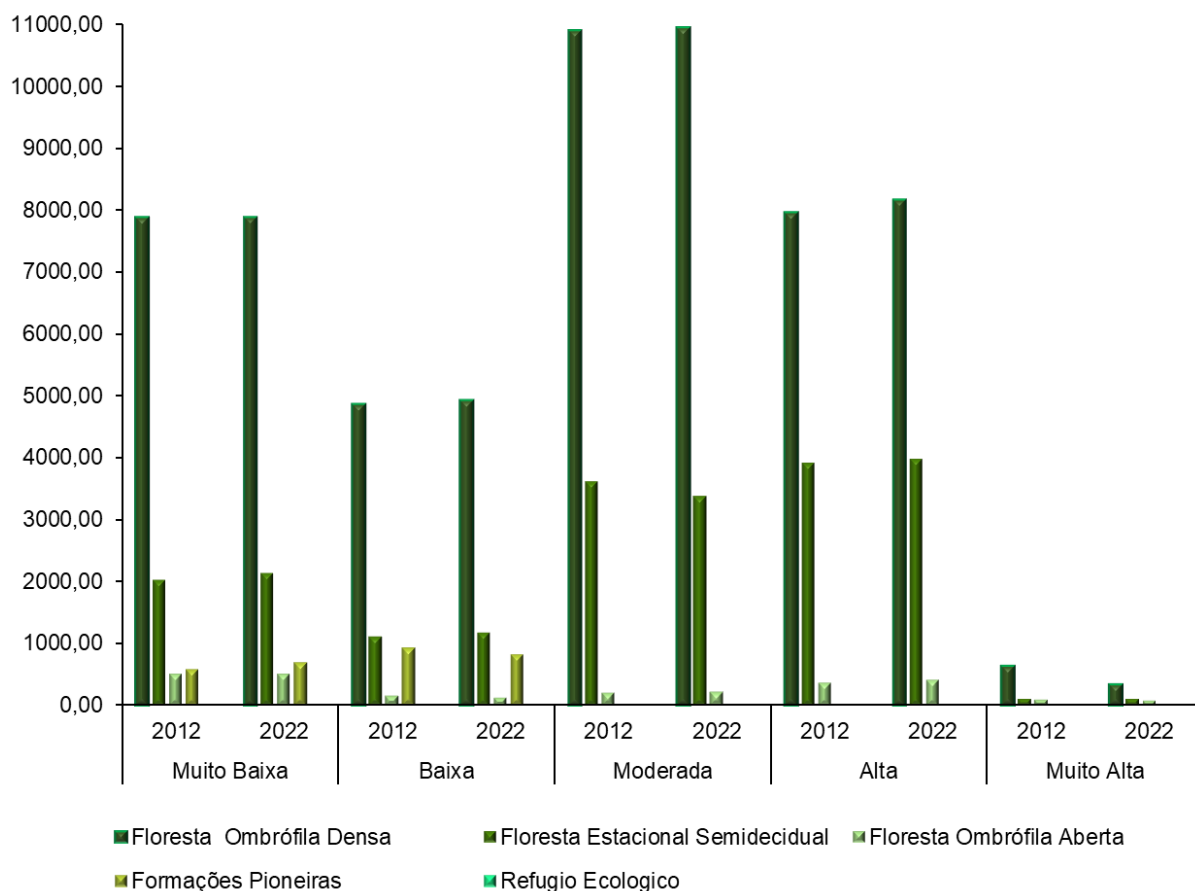
Figura 13 – Fitofisionomias do Bioma Mata Atlântica no estado do Espírito Santo

Fitofisionomias do Bioma Mata Atlântica Estado do Espírito Santo

Fitofisionomias	Área (km ²)	Porcentagem (%)
Floresta Ombrófila Densa	32318,56	70,16
Floresta Estacional Semidecidual	10814,96	23,48
Floresta Ombrófila Aberta	1370,62	2,98
Formações Pioneiras	1531,25	3,32
Refúgio Ecológico	27,06	0,06
Total	46062,45	100,00

Fonte: a autora.

Figura 15 - Valores de área em km² das fitofisionomias dentro das classes de vulnerabilidade ambiental



Fonte: a autora.

A maior parte do estado do Espírito Santo pertence a fitofisionomia de Floresta Ombrófila Densa o que faz com que a área desta fitofisionomia seja maior dentro das categorias de vulnerabilidade ambiental.

De 2012 para 2022, houve uma redução de 297,10 km² de Floresta Ombrófila Densa classificada como Muito Alta vulnerabilidade e de 13,91 km² classificado como Muito Baixo vulnerabilidade. Enquanto, notou-se um aumento de área desta fitofisionomia classificada como Alta (201,18 km²), Moderada (42,59 km²) e Baixa (67,38 km²).

Ao analisarmos a Floresta Estacional Semidecidual nota-se uma redução de área desta fitofisionomia classificada como Muito Alta (0,39 km²) e moderada (229,51 km²) vulnerabilidade ambiental e um aumento de área classificada como Alta (67,52 km²), Baixa (57,95 km²) e Muito Baixa (104,43 km²).

A alteração de classificação de vulnerabilidade para o território pertencente a fitofisionomia de Floresta Ombrófila Aberta se deu pela redução de área pertencente as classes de vulnerabilidade Muito Alta (21,23 km²), Baixa (21,56 km²) e Muito Baixa (0,32 km²) e um aumento para as classes de Alta (37,47 km²) e Moderada (5,64 km²).

6 DISCUSSÃO

A distribuição de classes de vulnerabilidade, ao longo do período analisado, demonstrou o predomínio das classes Moderada e Alta para o estado do Espírito Santo (Figura 12). Os resultados apresentados no mapa de vulnerabilidade ambiental do Estado do Espírito Santo, podem apontar para diferentes cenários de vulnerabilidade conforme o coeficiente *gamma* aplicado, que neste estudo foi $\gamma 0,9$. No uso da lógica *fuzzy* para análise de vulnerabilidade de fragmentos florestais na Amazônia mato-grossense, Penha, Fonseca & Korting, (2017), observaram que os valores de *gamma* mais próximos de 1, tiveram maiores variações nas classes de vulnerabilidade. Isso sugere que o operador é particularmente sensível às variáveis em casos de valores mais elevados de *gamma*.

É notado também que no uso da mesma temática (vulnerabilidade ambiental), com diferentes abordagens metodológicas os resultados apontarão para cenários mais ou menos restritivos, especialmente quando são trabalhadas em escala espaço-temporal (COSTA; SEABRA, 2019). A exemplo disso, os estudos sobre vulnerabilidade ambiental em diferentes regiões do estado do Espírito Santo, revelam cenários potencialmente críticos. Filgueiras; Albino, (2020), no estudo para o litoral sul do Espírito Santo, demonstraram que em 49% dos 44km do litoral se encontravam com classes Moderada a Muito Alta.

Pautz et al. (2023), em análise da vulnerabilidade ambiental na Lagoa Juparanã no norte do estado, demonstrou que maior parte da área em estudo apresentava as classes Alta e Muito Alta. Já Scaramussa *et al.* (2023) evidenciaram a influência das ações antrópicas em torno da zona de amortecimento de uma unidade de conservação no sul do estado do Espírito Santo e também encontraram prevalência das classes Alta e Muito Alta de vulnerabilidade ambiental.

Conforme o mapa de vulnerabilidade ambiental (Figura 12), em relação às categorias de vulnerabilidade Muito Alta e Alta, foi observado que essas classes estiveram mais presentes na região Norte do estado. O uso e cobertura da terra nos anos de 2012 e 2022, permitem uma melhor interpretação dos

resultados, onde a vulnerabilidade ambiental é dada pela associação da vulnerabilidade natural somado aos fatores antrópicos (GAMERO et al., 2023).

Barreto-Neto & Marchesi, (2019) em estudo vulnerabilidade socioambiental à desertificação no estado do Espírito Santo, também evidenciaram áreas com Alta vulnerabilidade no norte-noroeste do estado. Além disso, sugere-se o monitoramento dessas áreas de maior fragilidade ambiental.

O estado do Espírito Santo possui um Atlas de vulnerabilidade às inundações, um importante instrumento para a gestão do estado na identificação de locais mais propensos a eventos de inundação fluvial no território (IEMA, 2013). Embora haja estudos regionais sobre a vulnerabilidade ambiental, ao comparar os dados disponíveis no banco de dados do GEOBASES, não foi identificado um mapeamento abrangente para cada uma das fitofisionomias do bioma Mata Atlântica encontradas no estado do Espírito Santo.

Observou-se, neste trabalho, que as variáveis utilizadas divididas em categorias ambientais e antrópicas (Figura 3 e 4). Notavelmente, aquelas que ocuparam uma área significativa dentro do estado tiveram um peso maior na representação da vulnerabilidade ambiental. Um exemplo claro disso são as variáveis relacionadas à pastagem, (Figuras 9).

Nos dois anos analisados, a área total ocupada por variáveis antrópicas no uso e cobertura da terra superou as áreas de vegetação natural correspondentes às variáveis ambientais (Figura 3). Em 2012, as áreas de vegetação natural totalizavam 10.470,92 km², e as variáveis antrópicas ocupavam 22.335,62 km² (Figura 7). Em 2022, as áreas de vegetação natural registraram 10.584,62 km², enquanto as variáveis antrópicas ocuparam 20.487,43 km² (Figura 8). Nesse cenário é sugerido que o padrão de uso da terra receba uma atenção maior, devido aos impactos ambientais sobre a vegetação remanescente no estado, como o aumento da fragmentação, perda de biodiversidade, degradação do solo e pressão sobre os recursos naturais (BRANCO et al., 2021).

Embora tenha ocorrido uma redução na área total de Pastagem de 1.988,24 km² em 2022, ela permaneceu com as maiores áreas ocupadas no estado em 2012 e 2022, destacando-se entre as classes de UCT. A redução nas áreas de pastagens pode estar atrelada a otimização da produção agropecuária

no estado, com programa de melhoramento genético, conduzido pelo Governo do Estado e instituições parceiras (SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA ABASTECIMENTO AQUICULTURA E PESCA - SEAG, 2017).

As Pastagens tiveram maiores porcentagens de área observadas em todas as classes de vulnerabilidade (Muito Alta, Alta, Moderada, Baixa e Muito Baixa), fato que é associado a sua distribuição sobre a área total do estado. Em relação às categorias de degradação, a maior porção de Pastagem encontra-se em estado severo e moderado (Figura 13). Essas duas categorias estão mais distribuídas em áreas de vulnerabilidade Alta e Moderada, para os dois anos (2012 e 2022). Como ponto positivo é notada em 2022 a redução de área de vulnerabilidade para todas as categorias de degradação (Figura 13).

As áreas classificadas como Pastagem Severamente Degradada e Moderadamente Degradada representaram 76,23% do total em 2012, aumentando para 78,51% em 2022. Esses números indicam um crescimento significativo em comparação com as áreas de pastagens degradadas no estado. Segundo o Incaper (2018) .o estado do Espírito Santo abrangia uma extensão de 393 mil hectares de terras degradadas, das quais 61% eram compostas por pastagens.

A degradação de pastagens, é um problema comum em todas as regiões brasileiras, ligada as práticas erradas de manejo e a falta de conhecimento adequado dos aspectos dos solos. Como resultado, tem-se maior vulnerabilidade ambiental em áreas circunvizinhas dado o possível aumento dos processos erosivos, trazendo prejuízos ambientais e econômicos (MACEDO et al., 2014) (MACEDO et al., 2014).

O trabalho desenvolvido por Dadalto; Barreto & Sartori (2012) mostrou que áreas agrícolas degradadas no Espírito Santo, são resultados do uso inadequado do solo, sem considerar sua aptidão. Os autores apontaram que a região Noroeste apresentava maior extensão de área agrícola degradada, equivalente a 34,79% da área do estado.

Nos resultados encontrados para a região observou-se que a região Norte e Noroeste (Figura 12), apresentaram maior porção do território classificada como vulnerabilidade Alta e Muito Alta. Tais regiões requerem uma maior atenção para o monitoramento da vulnerabilidade ambiental.

A Formação Florestal apresentou maior parte da área ocupada pela classe de Vulnerabilidade Muito Baixa. O que se espera das regiões com vegetação natural mais conservadas. No estado do Espírito Santo, as áreas de vegetação mais bem conservadas estão predominantemente localizadas em Unidades de Conservação, isso destaca a relevância desses espaços protegidos na preservação o bioma Mata atlântica (FUNDAÇÃO SOS PRO-MATAATLÂNTICA, 2017).

A diminuição em Outras Formações não Florestais e o aumento no cultivo de Café apontam para mudanças nas práticas agrícolas e investimento na economia do estado do Espírito Santo. O cultivo de café no estado tem crescido significativamente, sendo o segundo no ranking de produtores e responsável por 30% da produção nacional no Brasil (INCAPER, 2023).

O aumento de área de Silvicultura em 2022 no estado do Espírito Santo pode ser fruto de investimentos do setor privado, com empresas atuantes no mercado de produtos florestais madeireiros e não madeireiros (IBÀ, 2023). Conforme já relatado por Siqueira *et al.* (2004) o estado possui estrutura que favorece a produção e o escoamento de produtos florestais.

Das cinco Fitofisionomias do bioma Mata Atlântica (Figura 14), a Floresta Ombrófila Densa, por ocupar maior área dentro do estado, apresentou a maior distribuição entre as classes de vulnerabilidade ambiental (Figura 15). Embora essa categoria tenha experimentado uma redução significativa de 13,91 km², houve um aumento nas classes Alta e Moderada.

A cobertura vegetal varia em resposta aos interesses econômicos, bem como à expansão das áreas urbanas, exercendo maior pressão sobre os diferentes tipos de fitofisionomia no estado do Espírito Santo, sendo mais evidenciado na Floresta Ombrófila Densa (Figura 15). Pessoa & Ponzoni (2015) a vulnerabilidade da fitofisionomia Ombrófila Densa no estado de São Paulo é especialmente relacionada ao desmatamento, considerando-se que é a região mais populosa do Brasil.

Notou-se uma redução da área classificada como Muito Alta vulnerabilidade das fitofisionomias de Floresta Ombrófila Densa, Floresta Estacional Semidecidual e Floresta Ombrófila Aberta e consequente aumento de áreas classificadas com vulnerabilidade inferior. Tal fator é um indicativo positivo

em relação a vulnerabilidade ambiental do estado para o ano de 2022 em relação ao ano de 2012.

A redução das áreas das fitofisionomias do estado do Espírito Santo classificadas como vulnerabilidade Muito Alta (Figura 15) e (Apêndice - E), pode ser um resultado de políticas conservacionistas como a implementação e do código florestal de 2012, que dentre os seus objetivos está o de reduzir o desmatamento de áreas nativas, e orientar quanto as atividades que gerem degradação ambiental (BRASIL, 2012b).

Podemos citar também entre as iniciativas governamentais que colaboram para redução de áreas degradadas por meio da reorganização e reestruturação do território o Cadastro Ambiental Rural (CAR), o estabelecimento do marco regulatório de 2008 voltado à recuperação de áreas degradadas e a implementação do Programa de Regularização Ambiental (PRA) implementados com Código Florestal de 2012, estão (PIRES-LUIZ; STEINKE, 2019).

A redução da vulnerabilidade Muito Alta pode ser atribuída, em parte, aos programas de conservação e restauração ambiental, como o Reflorestar no estado do Espírito Santo, que está em operação desde 2011. Este programa engloba uma série de ações, tais como reflorestamento, controle de incêndios, recuperação de áreas degradadas e práticas de manejo sustentável (SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - SEAMA, 2023).

Para reduzir a vulnerabilidade ambiental e a pressão antrópica sobre as áreas de vegetação nativa, o estado do Espírito Santo também tem atuado em projetos de parcerias público-privadas com objetivo de diversificar e ampliar a produção e renda dos agricultores familiares. O “Mais Floresta Produtiva”, destaca como uma alternativa de diminuir a pressão dos produtos oriundos dos remanescentes florestais e diversificação de renda para os produtores (SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA, ABASTECIMENTO, 2017).

O fortalecimento da legislação ambiental ao longo do tempo, com medidas mais rigorosas para proteção da vegetação nativa no território brasileiro, trouxe maiores restrições à exploração de áreas florestais ou próximas a elas (BRASIL, 2000, 2006, 2012a). A criação das unidades de conservação e as zonas de amortecimento desempenham um papel na redução da vulnerabilidade, pois

restringe áreas de ocupação da terra, para que atividades impactantes como desmatamento não avance e coloquem em risco áreas que devem ser protegidas (BRASIL, 2000).

7 CONCLUSÃO

A análise da vulnerabilidade ambiental da vegetação no estado do Espírito Santo revelou a influência significativa da atividade antrópica na dinâmica do ambiente. A distribuição da vulnerabilidade ambiental para a vegetação no estado teve o predomínio das classes Moderada e Alta, com uma redução

observada na classe Muito Alta para as diferentes fitofisionomias, de 2012 a 2022.

No contexto do uso e cobertura da terra, as categorias antrópicas ocuparam áreas maiores nas categorias Muito Alta, Alta e Moderada, com destaque das classes voltadas para a agricultura, silvicultura e pastagem, durante o período analisado.

Os resultados apontados neste trabalho podem subsidiar gestão do estado no monitoramento de potenciais riscos ambientais, ao apontar as áreas ocupadas por classes de alta vulnerabilidade. No entanto estudos futuros são necessários para uma compreensão em escala temporal mais abrangente dos padrões e processos que influenciam a vulnerabilidade ambiental da vegetação no estado do Espírito Santo.

A metodologia empregada neste estudo demonstra sua capacidade de ser adaptada em ambiente SIG para uma variedade de locais e tipos de vegetação. Isso proporciona uma base comparativa para análises futuras, onde as variáveis podem ser substituídas ou complementadas para uma representação ainda mais precisa do contexto ambiental.

8 REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, F. N. B. de et al. OS CONCEITOS DE BIOMA E DOMÍNIO MORFOCLIMÁTICO NAS VIDEOAULAS DE GEOGRAFIA: ABORDAGENS E DESAFIOS. **Revista Tamoios**, v. 18, n. 2, 21 jul. 2022. Disponível em: <<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/tamoios/article/view/61114>>.
- ALMEIDA, D. S. De. **Recuperação ambiental da Mata Atlântica**. 3 edição ed. Ilhéus-BA: SciELO Books, 2016.
- APREMAVI. **Mata Atlântica - Paisagens da Mata • Apremavi**. Disponível em: <<https://apremavi.org.br/mata-atlantica/paisagens-da-mata/>>. Acesso em: 9 set. 2023.
- AQUINO, A. R. de; PALETTA, F. C.; ALMEIDA, J. R. de. **Vulnerabilidade Ambient**. 1. ed. São Paulo - SP: Blucher, 2017.
- BARRETO-NETO, A. A.; MARCHESI, A. F. AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL À DESERTIFICAÇÃO NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, BRASIL. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, n. 51, p. 28–40, 10 jun. 2019. Disponível em: <http://rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/79>.
- BATALHA, M. A. O cerrado não é um bioma. **Biota Neotropica**, v. 11, n. 1, p. 21–24, mar. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1676-06032011000100001&lng=pt&tlng=pt>.
- BEZZON, R. Z.; DINIZ, R. E. D. S. O CONCEITO DE ECOSSISTEMA EM LIVROS DIDÁTICOS DE BIOLOGIA DO ENSINO MÉDIO: ABORDAGEM E POSSÍVEIS IMPLICAÇÕES. **Educação em Revista**, v. 36, 2020. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-46982020000100230&tlng=pt>.
- BRANCO, A. F. V. C. et al. Avaliação da perda da biodiversidade na Mata Atlântica. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 4, p. 1885–1909, 17 nov. 2021. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/53310>>.
- BRASIL. **Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012. Camara dos Deputados - Centro de documentação e informação**. Brasília - DF: Diário Oficial da União, Seção 1, p. 1. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. , 2012a
- _____. **LEI Nº 9.985, DE 18 DE JULHO DE 2000**. . Brasília -DF: Diário Oficial da União, Seção 1, p.1. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/areas-protegidas/sistema-nacional-de-unidades-de-conservacao-da-natureza-snuc>>. Acesso em: 12 jul. 2023. , 2000
- _____. **LEI Nº 11.428, DE 22 DE DEZEMBRO DE 2006**. . Brasília - DF: Diário Oficial da União, Seção 1, p.1. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11428.htm>. , 2006
- _____. **LEI Nº 12.651, DE 25 DE MAIO DE 2012**. . Brasília-DF: Diário Oficial

da União, Seção 1, p.1. Disponível em:

<https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. , 2012b

BRASIL, M. do M. A. **vulnerabilidade ambiental desastres naturais ou fenômenos induzidos?** 2. ed. Brasília - DF: [s.n.], 2007. Disponível em:

<https://fld.com.br/wp-content/uploads/2019/07/Vulnerabilidade_Ambiental_Desastres_Naturais_ou_Fenomenos_Induzidos.pdf>.

CÂMARA, G. et al. **Introdução à ciência da geoinformação. Introdução à Ciência da Geoinformação.** São José dos Campos-SP: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/%5Cnwww.dpi.inpe.br/gilberto/livro>>. , 2001

CAVALCANTE, D. G. et al. Análise da vulnerabilidade ambiental de um fragmento florestal urbano na Amazônia: Parque Estadual Sumaúma. **Sociedade & Natureza**, v. 22, n. 2, p. 391–403, ago. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-45132010000200012&lng=pt&tlng=pt>.

COSTA, E. D. C. P.; SEABRA, V. D. S. ESCALA E TEMPO NA ANÁLISE DA PAISAGEM. **Revista Tamoios**, v. 15, n. 1, 1 jul. 2019. Disponível em: <<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/tamoios/article/view/42275>>.

COUTINHO, L. M. O conceito de bioma. **Acta Botanica Brasilica**, v. 20, n. 1, p. 13–23, mar. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-33062006000100002&lng=pt&tlng=pt>.

DA SILVA, S. D. P. et al. Modeling and detection of invasive trees using UAV image and machine learning in a subtropical forest in Brazil. **Ecological Informatics**, v. 74, p. 101989, maio 2023. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1574954123000183>>.

DADALTO, G. G.; BARRETO, P.; SARTORI, M. **Survey of degraded agricultural fields in the Brazilian state of Espírito Santo.** . [S.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.cedagro.org.br/artigos/20121101104111_AD-Documento-Resumo.pdf>. , 2012

DALL'IGNA, F.; MANIESI, V. Dinâmica espacial e temporal de focos de calor em unidade de conservação de corredor ecológico amazônico: o caso da intensa pressão antrópica na Floresta Nacional do Jamari/RO. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, p. e42011629271, maio 2022.

DECIAN, V. S. et al. DINÂMICA DO USO E COBERTURA DA TERRA E FRAGMENTAÇÃO FLORESTAL EM UMA ÁREA DE DRENAGEM NO NORTE DO RIO GRANDE DO SUL. **PERSPECTIVA**, p. 21–32, 2016.

EMBRAPA. **Bioma Caatinga - Portal Embrapa.** Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-caatinga>>. Acesso em: 8 fev. 2024.

ESCADA, M. I. S. **Aplicação de Técnica Fuzzy em SIG como alternativa para o Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE).** . São José dos Campos: [s.n.]. , 1998

ESPIRÍTO SANTO. **Geografia**. Disponível em:

<<https://www.es.gov.br/geografia>>. Acesso em: 21 jun. 2022.

EUGENIO, F. C. et al. MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, BRASIL. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 897–906, 31 ago. 2017. Disponível em:

<<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/28639>>.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Fundação lança estudo sobre Unidades de Conservação Municipais da Mata Atlântica | SOS Mata Atlântica**. Disponível em: <<https://www.sosma.org.br/noticias/fundacao-lanca-estudo-sobre-unidades-de-conservacao-municipais-da-mata-atlantica/>>.

Acesso em: 9 fev. 2024.

FUNDAÇÃO SOS PRO-MATA ATLÂNTICA. **30 anos de conservação do hotspot de biodiversidade da Mata Atlântica**. Disponível em:

<<https://cms.sosma.org.br/noticias/30-anos-de-conservacao-do-hotspot-de-biodiversidade-da-mata-atlantica/>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

_____. **Conservação da Mata Atlântica brasileira: um balanço dos últimos dez anos | SOS Mata Atlântica**. Disponível em:

<<https://www.sosma.org.br/artigos/conservacao-da-mata-atlantica-brasileira-um-balanco-dos-ultimos-dez-anos>>. Acesso em: 22 ago. 2023.

_____. **Mata Atlântica e Clima | SOS Mata Atlântica**. Disponível em:

<<https://www.sosma.org.br/artigos/mata-atlantica-e-clima/>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

GAMERO, A. R. et al. VULNERABILIDADE NATURAL E AMBIENTAL DA PAISAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SEPOTUBA, MATO GROSSO - BRASIL. **Caminhos de Geografia**, v. 24, n. 91, p. 258–271, 22 fev. 2023. Disponível em:

<<https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/62460>>.

GARBIN, M. L. et al. Breve histórico e classificação da vegetação capixaba. **Rodriguésia**, v. 68, n. 5, p. 1883–1894, dez. 2017. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2175-78602017000701883&lng=pt&tlng=pt>.

GEOBASES. **Geobases - DOWNLOADS**. Disponível em:

<<https://geobases.es.gov.br/downloads>>. Acesso em: 21 jun. 2022.

GONÇALVES, E. de O. et al. Mapeamento da vulnerabilidade socioambiental no espaço urbano de Russas, Ceará, Brasil: Uma integração de dados sociodemográficos e ambientais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 4, p. 1800–1814, 19 jul. 2022. Disponível em:

<<https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/253004>>.

GOOGLE EARTH ENGINE - GEE. **Google Earth Engine**. Disponível em:

<<https://earthengine.google.com/>>. Acesso em: 10 abr. 2023.

IBGE. **Biomass brasileiros | Educa | Jovens - IBGE**. Disponível em:

<<https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/18307-biomass-brasileiros.html>>. Acesso em: 13 nov. 2023a.

IBGE, I. B. de G. e E. **BDIA - Banco de Dados e Informações Ambientais**.

Disponível em: <<https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/vegetacao>>. Acesso em: 20 ago. 2023b.

_____. **Espírito Santo | Cidades e Estados | IBGE**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/es/>>. Acesso em: 26 jul. 2023.

ICMBIO, I. C. M. de C. da B.; MMA, M. do M. A. **Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção: Volume II - Mamíferos**. Brasília - DF: [s.n.], 2018. v. II. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/publicacoes-diversas/livro_vermelho_2018_vol2.pdf>.

IEMA. **IEMA - Geomática shapefiles**. Disponível em: <<https://iema.es.gov.br/geomatica/shapefiles>>. Acesso em: 19 ago. 2023.

IEMA, I. E. D. M. A. E. R. H. **IEMA - Atlas de Vulnerabilidade às Inundações no ES já está disponível para download**. Disponível em: <<https://iema.es.gov.br/atlas-de-vulnerabilidade-as-inundacoes-no-es-2>>. Acesso em: 8 set. 2023.

INCAPER. **Dia Mundial da Conservação do Solo: pesquisa aponta práticas de conservação do solo para renovação de pastagens degradadas**. Disponível em: <<https://incaper.es.gov.br/Noticia/dia-mundial-da-conservacao-do-solo-pesquisa-aponta-praticas-de-conservacao-do-solo-para-renovacao-de-pastagens-degradadas>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

INCAPER. **Programa de Assistência Técnica e Extensão Rural-PROATER 2020-2023**. , 1., nº 1. Vitória-ES: [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://incaper.es.gov.br/proater>>.

INPE. **Introdução ao Geoprocessamento**. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_geo.html>. Acesso em: 4 maio 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS -IBF. **Bioma Pampa - Instituto Brasileiro de Florestas**. Disponível em: <<https://www.ibflorestas.org.br/bioma-pampa>>. Acesso em: 8 fev. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS – IBF. **Bioma Amazônico**. Disponível em: <<https://www.ibflorestas.org.br/bioma-amazonico>>. Acesso em: 22 maio 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS – IBF, 2020. **Bioma Mata Atlântica - Instituto Brasileiro de Florestas**. Disponível em: <<https://www.ibflorestas.org.br/bioma-mata-atlantica>>. Acesso em: 4 ago. 2023.

IPAM. **Bioma**. Disponível em: <<https://ipam.org.br/glossario/bioma/>>. Acesso em: 11 nov. 2023.

JARDIM LEITE, R. I.; MELO JÚNIOR, J. C. F. Reconhecimento de grupos funcionais em um fragmento de Mata Atlântica em Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 821–833, 20 abr. 2020. Disponível em: <<https://revistasdemo.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/242139>>.

KULEVICZ, R. A. et al. ANALYSIS OF FORESTS' GENETIC VULNERABILITY AND ARGUMENTS TO REDUCE DEFORESTATION. **Ambiente & Sociedade**,

v. 23, 2020. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2020000100301&tlng=en>.

LIMA, B. C.; FRANCISCO, C. N.; BOHRER, C. B. de A. DESLIZAMENTOS E FRAGMENTAÇÃO FLORESTAL NA REGIÃO SERRANA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 4, p. 1283–1295, 11 dez. 2017. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/30321>>.

LIMA, M. S. de; SILVA, D. R. da; SILVA, M. A. M. O conceito “bioma” nos livros didáticos de Geografia no ensino médio. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, v. 16, n. 6, p. 249–262, 1 dez. 2021. Disponível em: <<https://periodicos.unifesp.br/index.php/revbea/article/view/12437>>.

LIRA, K. C. S.; FRANCISCO, H. R.; FEIDEN, A. Classificação de fragilidade ambiental em bacia hidrográfica usando lógica Fuzzy e método AHP. **Sociedade & Natureza**, METODOLOGIALÓGICA FUZZY APLICADA A ESPACIALIZAÇÃO DA VUNERABILIDADE DO BIOMA MATA ATLÂTICA, v. 34, n. 1, p. 1–17, 2022.

LOUZADA, F. L. R. O.; SANTOS, A. R.; SILVA, A. G. **Delimitação de corredores ecológicos no ArcGIS 9.3**. Alegre, ES: CAUFES, 2010.

MACEDO, M. C. M. . et al. **Degradação de pastagens, alternativas de recuperação e renovação, e formas de mitigação. Encontro de adubação de pastagens da Scot Consultoria - Tec - Fértil**. [S.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/976514/1/DegradacaopastagensalternativasrecuperacaoMMacedoScot.pdf>>. , 2014

MAPBIOMAS. **Coleções Mapbiomas**. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/downloads/>>. Acesso em: 10 abr. 2020a.

MAPBIOMAS. **mapbiomas-user-toolkit-fire.js - Earth Engine Code Editor**. Disponível em: <<https://code.earthengine.google.com/?scriptPath=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit%3Amapbiomas-user-toolkit-fire.js>>. Acesso em: 22 maio 2023b.

_____. **mapbiomas-user-toolkit-pasture.js - Earth Engine Code Editor**. Disponível em: <<https://code.earthengine.google.com/?scriptPath=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit%3Amapbiomas-user-toolkit-pasture.js>>. Acesso em: 21 maio 2023c.

MARCHESAN, J. et al. Mapping of environmental fragility in areas of the atlantic forest biome: Use of geotechnologies applied to Rio Grande do Sul. **Anuario do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 3, p. 586–598, 2019. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/31237>>.

MARDENI, V. D. N. et al. Delimitation of Ecological Corridor Using Technological Tools. **Sustainability**, v. 15, n. 18, p. 13696, 13 set. 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/18/13696>>.

MARRO, A. A. et al. Lógica Fuzzy: Conceitos e aplicações. **Journal of Personality Assessment**, p. 23, 2010.

MARTINS, T. B.; MARTINS, L. A.-C. P. Clements e o conceito de clímax. **Filosofia e História da Biologia**, v. 15, n. 2, p. 225–255, 2020.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **CARTA DA TERRA**. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/o-ministerio/quem-e-quem/item/8071-carta-da-terra.html>>. Acesso em: 12 ago. 2023a.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Mata Atlântica — Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/ecossistemas-1/biomas/mata-atlantica>>. Acesso em: 5 dez. 2023.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Pantanal**. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/biomas/pantanal.html>>. Acesso em: 8 dez. 2023b.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA - MMA. **Mata Atlântica**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/biomas/mata-atlantica_emdesenvolvimento.html>. Acesso em: 9 ago. 2023a.

_____. **Mudança do Clima e AbE**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/biomas/mata-atlantica_emdesenvolvimento/mudanca-do-clima-e-abe>. Acesso em: 16 set. 2023b.

_____. **VULNERABILIDADE AMBIENTAL Desastres naturais ou fenômenos induzidos?** 2. ed. Brasília - DF: [s.n.], 2007.

MONCRIEFF, G. R.; BOND, W. J.; HIGGINS, S. I. Revising the biome concept for understanding and predicting global change impacts. **Journal of Biogeography**, v. 43, n. 5, p. 863–873, 14 maio 2016. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jbi.12701>>.

MORAES, M. B. de et al. Espécies Exóticas e Alóctones da Bacia do Rio Paraíba do Sul: Implicações para a Conservação. **Revista Biodiversidade Brasileira**, v. 7, n. 1, p. 34–54, 2017. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/revistaelectronica/index.php/BioBR/issue/view/44>>.

MUKRIMAA, S. S. et al. **Hots Pots Revisitados**. [S.l: s.n.], 2016. v. 6.

NETO, D. S. R. **Entre Pontos Inacessíveis**. 2015. 86 f. Universidade Federal da Paraíba Centro de Ciências Exatas e da Natureza, 2015.

OLIVEIRA, R. E. de; ENGEL, V. L. A RESTAURAÇÃO FLORESTAL NA MATA ATLÂNTICA: TRÊS DÉCADAS EM REVISÃO. **Revista Cincia, Tecnologia & Ambiente**, v. 5, n. 1, p. 40–48, 2017. Disponível em: <<http://www.revistacta.ufscar.br/index.php/revistacta/article/view/77>>.

PADILHA, R. et al. Proposição de Modelo de Corredores Ecológicos com Base no Sistema de Informações Geográficas na Região de Suape, Pernambuco, Brasil (Propose a Model for Ecological Corridors Based on Geographic Information System in the Region of Suape, Pernambuco,...). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 1, p. 079–090, 26 jan. 2016. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/233617>>.

PAULA, E. M. S. de; SOUZA, M. J. N. de. Lógica Fuzzy como técnica de apoio ao Zoneamento Ambiental. **Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, n. 1991, p. 2979–2984, 2007.

PAUTZ, C. et al. Mapping the Environmental Vulnerability of a Lagoon Using

Fuzzy Logic and the AHP Method. **Water**, v. 15, n. 11, p. 2102, 1 jun. 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/15/11/2102>>.

PELUZIO, T. M. D. O. **LÓGICA FUZZY NA DETERMINAÇÃO DE FRAGMENTOS FLORESTAIS PARA COLETA DE SEMENTES**. 2017. 6–18 f. Universidade Federal do Espírito Santo, JERÔNIMO MONTEIRO – ES, 2017. Disponível em: <<https://cienciasflorestais.ufes.br/pt-br/pos-graduacao/PPGCFL/detalhes-da-tese?id=10575>>.

PENHA, T. V.; FONSECA, L. M. G.; KORTING, T. S. **Inferência fuzzy na análise de vulnerabilidade de fragmentos florestais na Amazônia mato-grossense**. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de sensoriamento Remoto-SBSR**. Santos- SP: [s.n.], 2017

PESSÔA, A. C. M.; PONZONI, F. J. Análise temporal da ação antrópica sobre diferentes fitofisionomias da Mata Atlântica nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro. p. 0123–0130, 2015.

PIRES-LUIZ, C. H.; STEINKE, V. A. O código florestal pode contribuir para a diminuição da degradação ambiental? **Caminhos de Geografia**, v. 20, n. 72, p. 230–241, 16 dez. 2019. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/44221>>.

PIZANI, F. M. C.; AZEVEDO, U. R. de; SOUZA, F. É. V. de. Geotecnologias aplicadas ao mapeamento da vulnerabilidade ambiental: estudo de caso do município de Rio Acima/MG. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 4687–4697, 2017. Disponível em: <<https://ocs.ige.unicamp.br/ojs/sbgfa/article/view/2081>>. Acesso em: 2 maio 2022.

PRADO, F. B.; VASCONCELOS, F. C. W.; CHIODI, C. K. Regime jurídico da Mata Atlântica e o risco à sobrevivência in situ de espécies ameaçadas. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 2, p. 1–16, jun. 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2014000200002&lng=pt&tlng=pt>.

QGIS. **Baixar o QGIS**. Disponível em: <https://www.qgis.org/pt_BR/site/forusers/download.html>. Acesso em: 22 set. 2023.

QUINTÃO, J. M. B. et al. Mudanças do uso e cobertura da terra no Brasil, emissões de GEE e políticas em curso. **Ciência e Cultura**, v. 73, n. 1, p. 18–24, jan. 2021. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252021000100004&tlng=pt>.

RAMALHO, A. H. C. et al. Optimal allocation model of forest fire detection towers in protected areas based on fire occurrence risk: Where and how to act? **Canadian Journal of Forest Research**, v. 54, n. 1, p. 68–82, 1 jan. 2024. Disponível em: <<https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/cjfr-2023-0084>>.

REIS, G. de A.; RIBEIRO, A. J. A.; DA SILVA, C. A. U. Diagnóstico de Vulnerabilidade Socioambiental em Áreas Urbanas Utilizando Inteligência Geográfica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 767–781, 18 abr. 2020. Disponível em:

<<https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/241398>>.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, jun. 2009. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0006320709000974>>.

SALES RODRIGUES AQUINO, P. et al. Uso de redes neurais artificiais na análise de variáveis ambientais associadas à deposição de serapilheira. **Comunicata Scientiae**, v. 7, n. 3, p. 394, 27 dez. 2016. Disponível em: <<https://www.comunicatascientiae.com.br/comunicata/article/view/1172>>.

SANTOS, A. R. dos et al. Fuzzy concept applied in determining potential forest fragments for deployment of a network of ecological corridors in the Brazilian Atlantic Forest. **Ecological Indicators**, v. 115, p. 106423, ago. 2020.

_____. Fuzzy logic applied to prospecting for areas for installation of wood panel industries. **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 345–359, maio 2017.

_____. **Livro Geotecnologias & análise ambiental: Aplicações práticas**. Alegre-Es: [s.n.], 2015. Disponível em: <<https://www.mundogeomatica.com/livrogeoteconologiaanaliseambiental.htm>>. Acesso em: 13 abr. 2022.

SANTOS, F. C. dos et al. Fragmentação florestal na Mata Atlântica: o caso do município de Paraíba do Sul, RJ, Brasil. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 15, p. 151–158, 2017. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/seerbio/ojs/index.php/rbb/article/view/3758/1367>>.

SANTOS, R. F. dos. **VULNERABILIDADE AMBIENTAL - desastres naturais ou fenômenos induzidos?** 2. ed. Brasília - DF: Ministério do Meio Ambiente, 2007. v. 13.

SANTOS, J. de O. RELAÇÕES ENTRE FRAGILIDADE AMBIENTAL E VULNERABILIDADE SOCIAL NA SUSCEPTIBILIDADE AOS RISCOS. **Mercator**, v. 14, n. 02, p. 75–90, 20 jul. 2015. Disponível em: <<http://www.mercator.ufc.br/index.php/mercator/article/view/1650/587>>.

SANTOS, P. M.; NASCIMENTO, M. T. Homogeneização biótica em comunidades arbóreas das florestas tropicais: uma revisão sistemática. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 4, p. 50–77, 25 ago. 2023. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/biologia/homogeneizacao-biotica>>.

SCARAMUSSA, L. M. et al. ENVIRONMENTAL VULNERABILITY OF ITABIRA NATURAL MONUMENT, ES, BRAZIL. **Revista Árvore**, v. 47, 2023. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622023000100225&tlng=en>.

SCARANO, F. R.; CEOTTO, P. Brazilian Atlantic forest: impact, vulnerability, and adaptation to climate change. **Biodiversity and Conservation**, v. 24, n. 9, p. 2319–2331, 2 set. 2015. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10531-015-0972-y>>.

SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO - SEDES. **Microrregiões**. Disponível

em: <<https://sedes.es.gov.br/microrregioes>>. Acesso em: 12 maio 2023.

SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA, ABASTECIMENTO, A. E. P. (SEAG). **SEAG - Mais Floresta Produtiva**. Disponível em: <<https://seag.es.gov.br/mais-floresta-produtiva>>. Acesso em: 12 jan. 2024.

SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA ABASTECIMENTO AQUICULTURA E PESCA - SEAG. **SEAG - Orientação e manejo adequado para recuperação de áreas degradadas**. Disponível em: <<https://seag.es.gov.br/orientacao-e-manejo-adequado-para-recuperacao>>. Acesso em: 20 jul. 2023.

SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - SEAMA. **SEAMA - Programa Reflorestar**. Disponível em: <<https://seama.es.gov.br/programa-reflorestar>>. Acesso em: 8 ago. 2023.

SEKI, M. S. et al. Classificação climática do Estado do Espírito Santo segundo as zonas de vida de Holdridge. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. Supl. 2, p. 1–19, 1 dez. 2021. Disponível em: <<https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/8007>>.

SIQUEIRA, J. D. P. et al. Estudo Ambiental Para Os Programas De Fomento Florestal Da Aracruz Celulose S. a. E Extensão Florestal Do Governo Do Estado Do Espírito Santo. **Floresta**, v. 34, n. 2, p. 3–67, 2004.

SOUSA, C. O. M. de et al. **O papel das estradas na conservação da vegetação nativa no estado de São Paulo. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Natal_RN: [s.n.], 2009.

SOUSA; DE, J. A. P. **Elaboração de um índice de vulnerabilidade ambiental dos fragmentos florestais da Mata Atlântica**. 2021. 162 f. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Sorocaba-SP, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/202686>>. Acesso em: 14 abr. 2022.

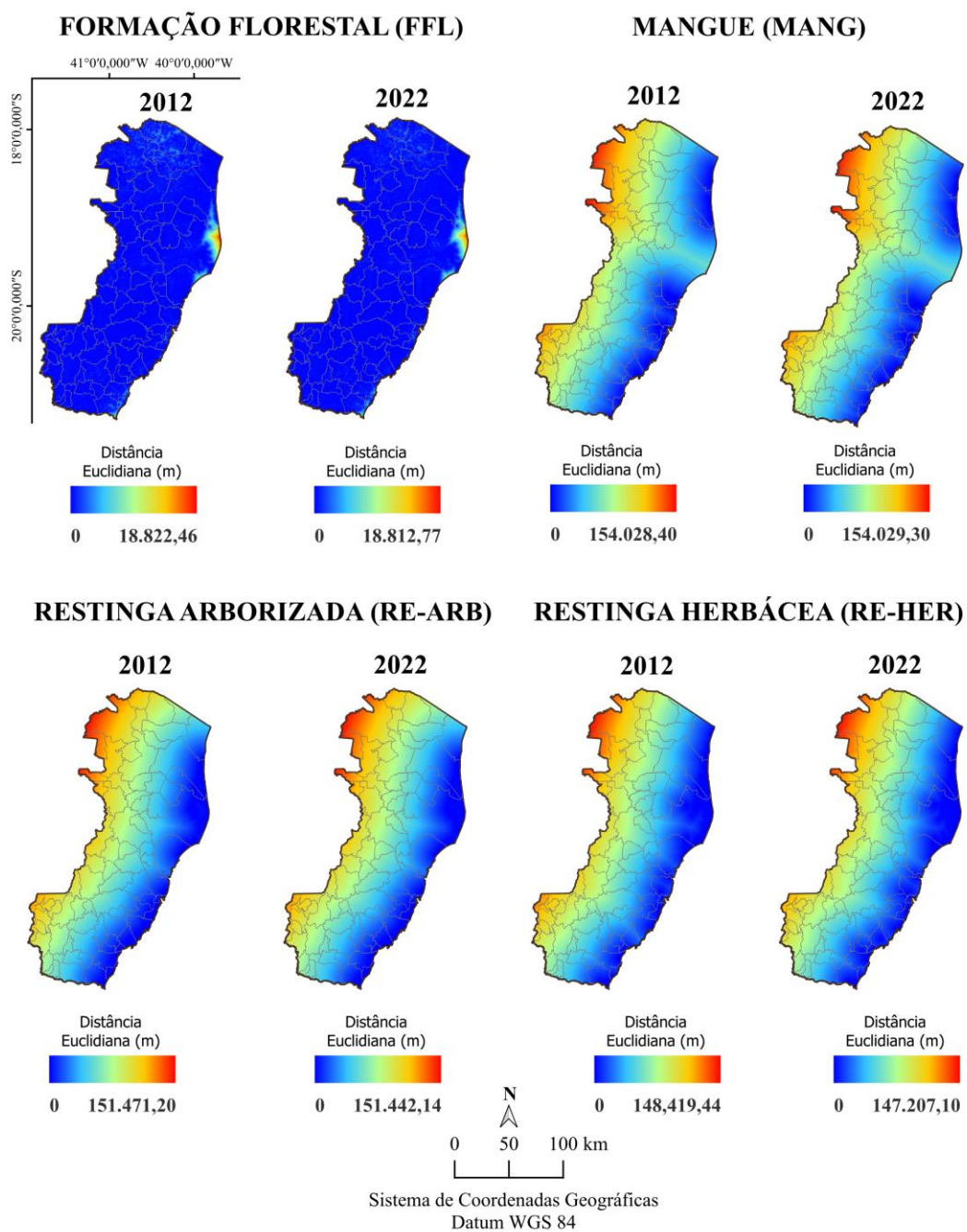
THOMAZ, L. A Mata Atlântica no estado do Espírito Santo, Brasil: de Vasco Fernandes Coutinho ao século 21. **Boletim do Museu de Biologia Mello Leitão**. **Boletim do Museu de Biologia Mello Leitão**, v. 27, p. 5–20, 2010.

VICENTE DE ASSIS, F. R. et al. USO DE GEOTECNOLOGIAS NA LOCAÇÃO ESPACIAL DE TORRES PARA DETECÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NO SEMIÁRIDO NORDESTINO. **FLORESTA**, v. 44, n. 1, p. 133, 8 jan. 2014. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/32618>>.

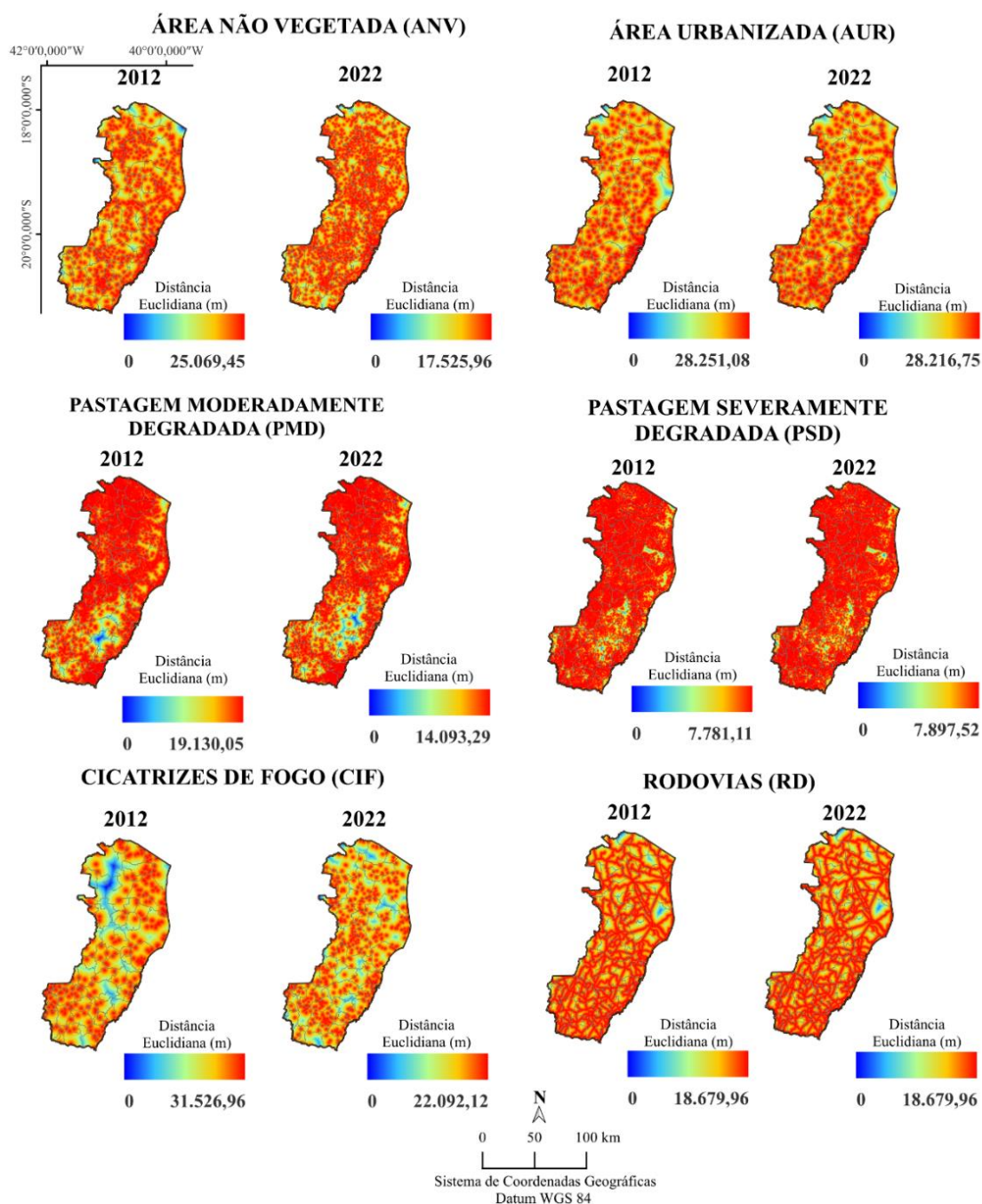
ZAÚ, A. S. FRAGMENTAÇÃO DA MATA ATLÂNTICA: ASPECTOS T E Ó R I C O S. **Floresta e Ambiente**, v. 5, n. 1, p. 89–103, 1998.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Distância euclidiana calculada para as variáveis ambientais

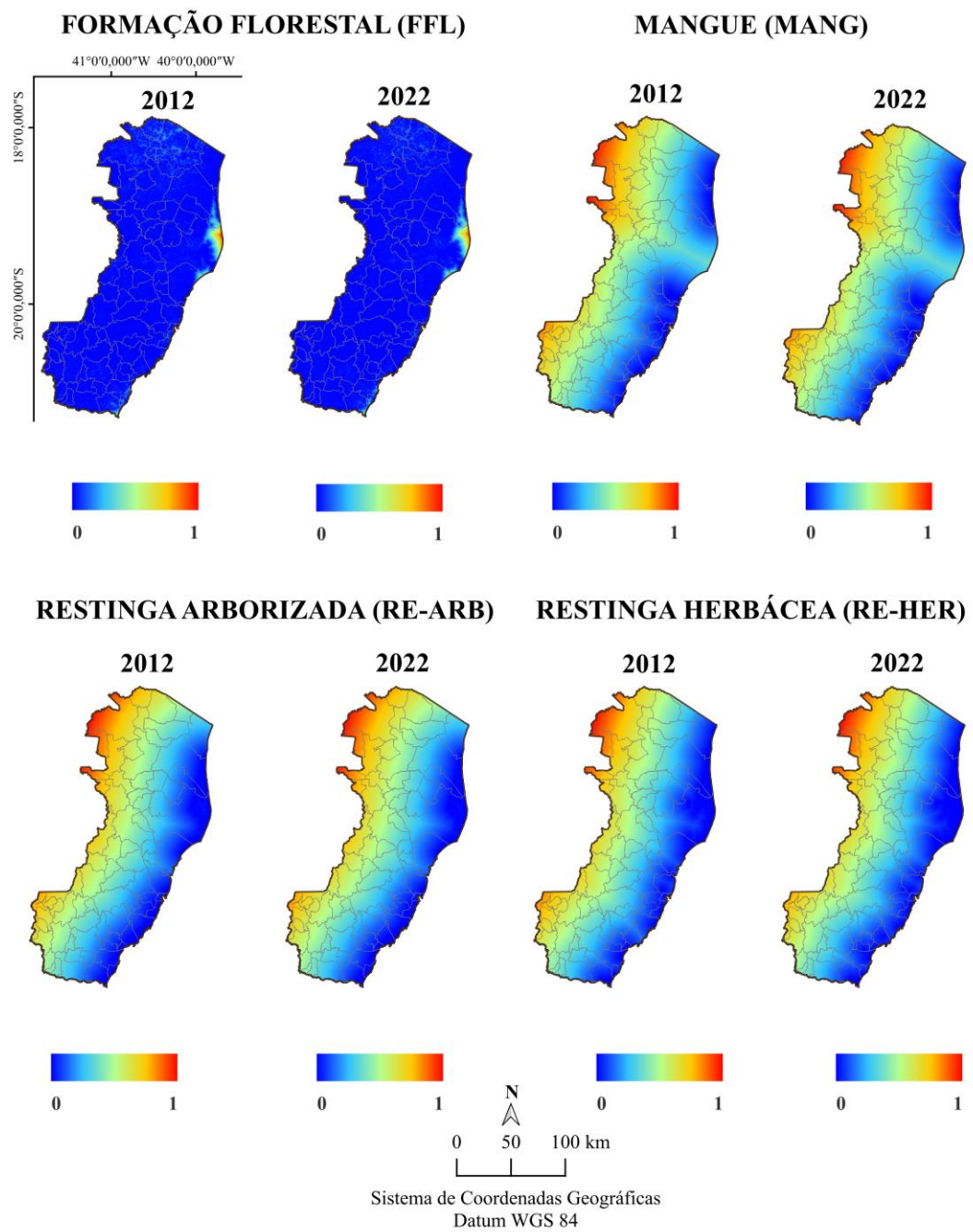


APÊNDICE B – Distância euclidiana calculada para as variáveis antrópicas

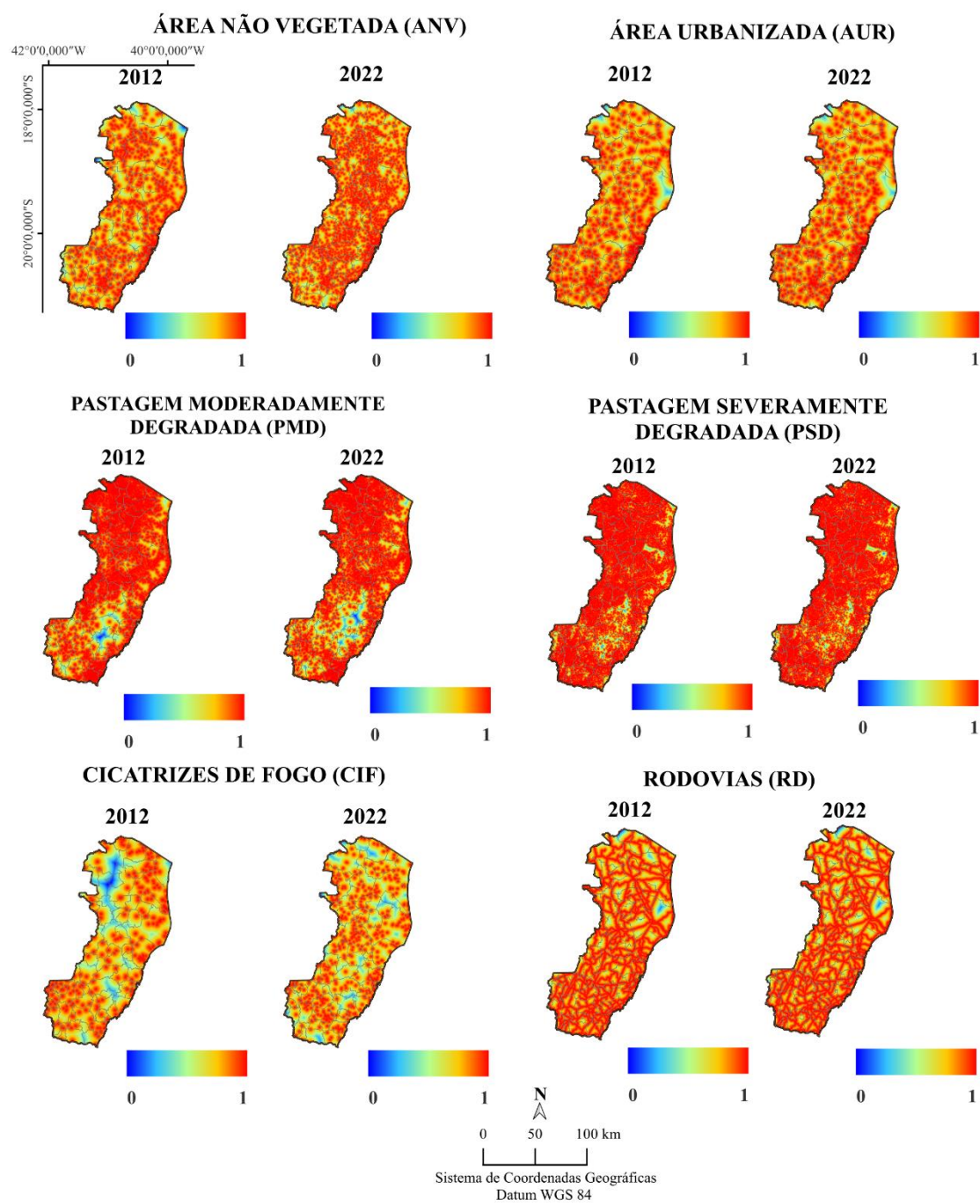


Ocorreu uma redução na distância euclidiana para Área Não Vegetada (ANV) de 7543,49 metros, Pastagem Moderadamente Degradada (PMD) com 5036,76 metros, Cicatrizes de Fogo (CIF) de 9434,84. Para Pastagem Severamente Degradada (PSD) um pequeno aumento de 116,41 metros.

APÊNDICE C – Variáveis ambientais fuzzyficadas.



APÊNDICE D – Variáveis antrópicas fuzzyficadas.



APÊNDICE E: Tabela 2 - Valores de área em km² e porcentagem das fitofisionomias dentro das classes de vulnerabilidade ambiental

Classe de vulnerabilidade	Fitofisionomia	2012	2022
		Área km ²	Área km ²
Muito Alta	Floresta Ombrófila Densa	649,83	352,73
	Floresta Estacional Semidecidual	122,77	122,38
	Floresta Ombrófila Aberta	106,84	85,61
	Formações Pioneiras	-	-
	Refúgio Ecológico	-	-
	Total	879,44	560,72
Alta	Floresta Ombrófila Densa	7977,74	8178,92
	Floresta Estacional Semidecidual	3911,78	3979,3
	Floresta Ombrófila Aberta	373,3	410,77
	Formações Pioneiras	-	-
	Refúgio Ecológico	4,5	1,8
	Total	12267,32	12570,79
Moderada	Floresta Ombrófila Densa	10911,8	10954,4
	Floresta Estacional Semidecidual	3620,76	3391,25
	Floresta Ombrófila Aberta	217,57	223,21
	Formações Pioneiras	6,43	-
	Refúgio Ecológico	10,96	12,27
	Total	14767,51	14581,11
Baixa	Floresta Ombrófila Densa	4877,55	4944,93
	Floresta Estacional Semidecidual	1122,94	1180,89
	Floresta Ombrófila Aberta	162,51	140,95
	Formações Pioneiras	929,52	827,77
	Refúgio Ecológico	-	0,19
	Total	7092,52	7094,73
Muito Baixa	Floresta Ombrófila Densa	7901,65	7887,74
	Floresta Estacional Semidecidual	2036,71	2141,14
	Floresta Ombrófila Aberta	510,40	510,8
	Formações Pioneiras	595,30	703,48
	Refúgio Ecológico	11,60	12,8
	Total	11055,66	11255,10

Fonte: a autora.