



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

GABRIEL SEVERO CARVALHO

ESTRATÉGIAS DE PREVENÇÃO AOS INCÊNDIOS FLORESTAIS COM BASE EM  
ANÁLISES GEOESPACIAIS

JERÔNIMO MONTEIRO  
ESPÍRITO SANTO

2024

GABRIEL SEVERO CARVALHO

ESTRATÉGIAS DE PREVENÇÃO AOS INCÊNDIOS FLORESTAIS COM BASE EM  
ANÁLISES GEOESPACIAIS

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2024

GABRIEL SEVERO CARVALHO

ESTRATÉGIAS DE PREVENÇÃO AOS INCÊNDIOS FLORESTAIS COM  
BASE EM ANÁLISES GEOESPACIAIS

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Aprovada em 24 de junho de 2024

COMISSÃO EXAMINADORA



---

Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador



Documento assinado digitalmente

ANTONIO HENRIQUE CORDEIRO RAMALHO

Data: 26/06/2024 10:22:55 -0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

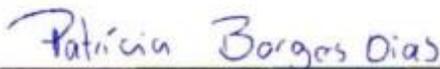
---

Prof. Dr. Antonio Henrique Cordeiro Ramalho  
Universidade Federal do Oeste do Pará



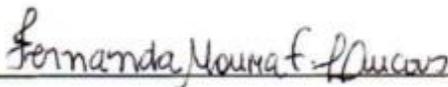
---

MSc. Leonardo Duarte Biazatti  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

Dra. Patricia Borges Dias  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

MSc Fernanda Moura Fonseca Lucas  
Universidade Federal do Espírito Santo

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio e amor incondicional ao longo da vida e desta jornada acadêmica, dedico.

*“Em Deus nós confiamos. Todos os outros trazem os dados”*  
(Edwards Deming)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que me ampara e me dá sabedoria para atingir os meus objetivos.

Aos meus pais, Fernando e, especialmente, a minha mãe Margarida por todo apoio e carinho durante toda a vida, pois, se cheguei até aqui é graças a todo o esforço, dedicação e confiança que depositaram em mim. Aos meus irmãos Marineuza, Fernanda e Robernando por serem meus companheiros e exemplos de vida, que reconhecem meu esforço e me motivam.

A minha namorada Bruna, que está comigo desde o 1º ano do ensino médio, presente nos momentos bons e ruins, sempre acreditando no meu potencial (mais do que eu mesmo). Tenho muito orgulho da grande mulher e profissional que é, incentivando-me a ser cada dia melhor.

A meu professor/orientador Nilton Cesar Fiedler pela oportunidade de desenvolver esse trabalho e por todos os conselhos e ensinamentos durante a orientação e nas disciplinas ministradas durante o curso. Além disso, por todo carisma e alegria que esbanja, alegrando a todos no dia a dia do laboratório.

Ao meu coorientador do PIBIC Leonardo Biazatti que se tornou um grande amigo. Obrigado pela plena disponibilidade e auxílio desde o PIBIC até este trabalho. Que possamos realizar mais trabalhos no futuro.

Aos meus amigos de moradia, Matheus, Deusdete e Gustavo, que conviveram comigo além da sala, por compartilharem momentos de descontração e companheirismo, sou muito grato por essas grandes amizades.

Aos meus colegas Anna, Bia, prima Chárol, Karol, João Pedro e Thiago Família por tornarem o ambiente universitário mais leve e agradável.

A todos os membros do NUPEME, à Fernanda Lucas, Leonardo Biazatti, Mariana Aragão, Patrícia Borges, William Masioli, Estefany Vaz e os demais alunos de PIBIC pelos ensinamentos técnicos/científicos que me ajudaram a desenvolver este trabalho e a vida profissional, além de trocas de experiência e convívio agradável.

A Universidade Federal do Espírito Santo, pelo ensino gratuito e de extrema qualidade e, por fim, agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo apoio e concessão da bolsa.

## RESUMO

Os Incêndios florestais desencadeados por causas naturais ou antrópicas causam sérios danos ao meio ambiente, economia e sociedade, sendo uma das principais ameaças para as áreas protegidas. Deste modo, conhecer os locais de maior vulnerabilidade ao fogo é fundamental na elaboração de planos de prevenção e combate aos incêndios florestais. Assim, objetivou-se com o presente estudo, utilizar o Zoneamento de Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais e o mapa de distribuição de material combustível como auxiliares na adoção de medidas preventivas para Reserva Biológica de Sooretama e sua zona de amortecimento. A modelagem *Fuzzy* foi empregada para identificar as regiões com maior probabilidade de ocorrência de incêndios. Foram consideradas as variáveis: ocupação do solo, características topográficas, proximidade da malha viária, zonas de calor e condições meteorológicas. A Análise de mistura espectral é uma técnica de processamento de imagens utilizada para identificar alvos menores que a resolução espacial das cenas. Nesse trabalho a análise de mistura espectral foi aplicada para analisar as frações de vegetação seca, vegetação verde e solo exposto. Os dados do zoneamento de risco e da análise de mistura compuseram os locais ótimos para alocações dos aceiros. Os resultados mostraram que a área de estudo possui risco de incêndios de moderado a alto, pois ambas, somadas, representam 60,74% da Reserva de Sooretama e sua zona de amortecimento. A classe de risco muito alto ocupou 22,94% do território. Essas áreas estão sob o domínio das classes de agricultura, pastagem, formação herbácea inundável e herbácea inundada, bem como próximos à malha viária. Notou-se que cerca de 20,15% da área de estudo consiste em vegetação seca ou morta, principalmente concentrada na Zona de Amortecimento da Reserva. As atividades agropecuárias, especialmente pastagem e agricultura, predominam nas áreas de vegetação seca, aumentando assim o risco de incêndios. As áreas prioritárias para construção de aceiros representaram 17,36% da área de estudo. Portanto, os resultados obtidos com este trabalho possibilitaram visualizar a distribuição espacial das áreas mais vulneráveis aos incêndios florestais, contribuindo para a tomada de decisão.

**Palavras-chave:** Risco de Incêndios, Proteção Florestal, Áreas protegidas.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
2.1 Objetivo geral.....	1
2.2 Objetivos específicos .....	1
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>2</b>
3.1 Incêndios florestais .....	2
3.2 Áreas Protegidas.....	2
3.2.1 Reserva Biológica de Sooretama e sua Zona de Amortecimento .....	3
3.3 Estratégias de prevenção contra os incêndios florestais .....	4
3.4 Geotecnologias aplicada aos incêndios florestais.....	5
3.4.1 Lógica <i>Fuzzy</i> .....	5
3.5 Mapeamento de material combustível .....	6
3.5.1 Análise de Mistura Espectral .....	6
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>8</b>
4.1 Caracterização da área de estudo .....	8
4.2 Procedimento metodológico.....	8
4.2.1 Zoneamento de Risco de Ocorrência de Incêndio Florestal .....	9
4.2.2 Aquisição da Base de dados.....	10
4.2.3 Atualização da tabela de atributos (UOT) .....	10
4.2.4 Aplicação da distância euclidiana nas classes de estradas e densidade de Kernel de focos de calor .....	11
4.2.5 Fuzzificação das variáveis analisadas .....	11
4.2.6 Sobreposição Fuzzy Gamma.....	13
4.2.7 Validação do Modelo .....	14
4.2.1 Mapa de Distribuição de Material Combustível.....	14

4.2.2 Análise de Mistura Espectral.....	15
4.2.3 Validação das assinaturas espectrais dos <i>endmembers</i> .....	17
<b>4.3 Delimitação de áreas prioritárias para construções de aceiros .....</b>	<b>17</b>
<b>4.3.2 Áreas impróprias para a construção de aceiros .....</b>	<b>17</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>18</b>
5.1. Zoneamento de Risco de Ocorrência incêndios florestais .....	18
5.1.2 Variáveis analisadas no modelo .....	18
5.1.3 Análise do Zoneamento de Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais ....	20
5.1.4 Validação do modelo.....	25
<b>5.2 Distribuição Espacial de Material Combustível .....</b>	<b>25</b>
5.3 Validação das assinaturas espectrais dos <i>endmembers</i> .....	27
5.3 Áreas prioritárias para construção de aceiros .....	28
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>32</b>
<b>5. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>33</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Reclassificação do Uso e Ocupação da Terra de acordo com a influência sobre os riscos de incêndios florestais .....	12
Tabela 2 – Risco de ocorrência de incêndios florestais de acordo com a altitude ....	13
Tabela 3 – Risco de ocorrência de incêndios florestais de acordo com a temperatura do ar e da superfície terrestre .....	13
Tabela 4 - Histórico de áreas queimadas e sua proporção por classe de risco .....	25

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.....	8
Figura 2 – Fluxograma metodológico das etapas de elaboração do mapa de risco de incêndio florestal da Reserva Biológica de Sooretama e sua Zona de Amortecimento. ....	9
Figura 3 – Mistura espectral de diferentes alvos em um pixel.....	15
Figura 4 – Endmembers de vegetação verde (a), solo exposto (b) e vegetação seca (c) plotados do visualizador de layers do Google Earth Engine. ....	16
Figura 5 – Etapas do processamento do mapa de distribuição de material combustível. ....	16
Figura 6 – Distribuição espacial das variáveis analisadas na área de estudo.....	18
Figura 7 – Distribuição espacial das variáveis analisadas na área de estudo.....	19
Figura 8 – Influência das variáveis sobre as classes de risco de incêndios florestais. ....	20
Figura 9 – Influência das variáveis sobre as classes de risco de incêndios florestais. ....	21
Figura 10 – Zoneamento de Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais (ZROIF) da Reserva Biológica de Sooretama e sua zona de amortecimento. ....	22
Figura 11– Distribuição da vegetação seca, vegetação verde e solo exposto derivadas de imagens Sentinel – 2. ....	26
Figura 12 – Proporção das classes do uso e ocupação do solo aderida aos locais de vegetação seca. ....	27
Figura 13 – Gráfico de assinaturas espectrais dos endmembers vegetação seca, solo exposto e vegetação verde.....	28
Figura 15 – (A) Áreas prioritárias para construção de aceiros; (B) Faixas de aceiros de 15m e 30m. ....	29

## 1 INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica compõe o terceiro maior bioma brasileiro e ocupa a segunda posição em extensão de floresta tropical no mundo (Cardoso, 2016).

Esse ecossistema, com aproximadamente 130.973.638 ha fornece serviços ecossistêmicos fundamentais para a manutenção da biodiversidade, além do controle da erosão do solo e regulação do ciclo do carbono (Ribeiro et al., 2009). Entretanto, essa riqueza ecológica sofre com os efeitos da fragmentação florestal, tornando esses remanescentes suscetíveis às consequências da mudança do uso da terra, variabilidade climática, expansão urbana e regime dos eventos com o fogo (He; Yang; Guo, 2020; Crowther et al., 2015).

O uso do fogo vem sendo utilizada para a realização de queimadas periódicas com diversas finalidades como renovação de pastagens, preparação de terrenos para novas culturas, controle de pragas e eliminação de resíduos florestais. Porém, quando o comportamento do fogo foge do controle do ser humano torna-se altamente destrutivo, caracterizando os Incêndios Florestais (IF) (HERRMANN, 2023; FIEDLER et al., 2020; TORRES et al., 2020).

Diante nessas problemáticas, o fomento para criação das Unidades de Conservação se tornou um grande aliado na proteção da biodiversidade da Mata Atlântica e demais biomas do país (BRASIL, 2000). As Unidades de Conservação do país enfrentam principalmente desmatamento e ocupações irregulares, sendo essas ligadas as práticas de queimadas ilegais, que podem resultar em incêndios florestais de grande escala.

A maior parte dos IF ocorrem em períodos de estiagem e são ocasionados a partir de atividades humanas, seja por ação involuntária ou negligência ao manusear o fogo (Rocha et al., 2013; Santos; Soares; Batista, 2006). Nesse sentido, é necessária a adoção de estratégias eficientes de medidas preventivas e de combate, de modo que evitem ou suavizem os prejuízos acarretados pelos IF principalmente em áreas protegidas.

O uso das geotecnologias se apresenta como uma ferramenta inteligente para a gestão territorial, como o caso das UC brasileiras, que possuem grandes extensões de terra (Borges et al., 2021). Esses recursos permitem analisar, de forma temporal e espacial, as probabilidades de ocorrência dos incêndios florestais, seja por meio de zoneamentos de risco de ocorrência ou pela determinação de regiões

com acúmulo de vegetação seca (Aragão et al., 2023; You et al., 2017; Eugenio et al., 2016).

Os mapas de Zoneamento de Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais (ZROIF) possibilitam visualizar a distribuição espacial de áreas com diferentes níveis de risco de incêndios, usando variáveis intrínsecas aos locais de estudo que influenciam no início e na propagação do fogo como variáveis meteorológicas, topográficas e antrópicas (White; Ribeiro, 2016; Pezzopane; Neto; Viela, 2012). Nesse mesmo sentido, o uso do sensoriamento remoto vem tendo resultados promissores em estudos de mapeamento de material combustível em áreas florestais (Arroyo; Pascual; Manzanera, 2008; Asner et al., 2005). Essas informações espaciais são importantes no planejamento de medidas preventivas que podem ser tomadas para o controle dos incêndios, tais como: aberturas e manutenção de aceiros, redução de material combustível, vigilância em zonas de maior risco e campanhas educativas (Ramalho et al., 2021; Tebaldi; Fiedler; Juvanhol 2013).

Sendo assim, com este estudo, objetivou-se a avaliação do potencial das geotecnologias no mapeamento de áreas mais suscetíveis aos incêndios florestais, com o propósito de contribuir no planejamento e implementação de estratégias preventivas contra o fogo na Reserva Biológica de Sooretama e sua zona de amortecimento.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Determinar áreas prioritárias para a adoção de medidas preventivas contra os incêndios florestais na Reserva Biológica de Sooretama e sua zona de amortecimento, utilizando recursos geotecnológicos.

### **2.2 Objetivos específicos**

- a)** Delimitar as áreas de maior risco de ocorrência de incêndios florestais;
- b)** Analisar a distribuição espacial do material combustível na Unidade de Conservação e sua zona de amortecimento; e
- c)** Definir as áreas prioritárias para construção de aceiros como ações preventivas aos incêndios florestais.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 Incêndios florestais**

Os incêndios florestais são eventos de fogo sem controle que se transformam em um agente de grande potencial destrutivo, podendo ocorrer por ações antrópicas ou naturais, sendo que, em mais de 90% dos casos, os humanos são os responsáveis (Fiedler et al., 2020; Torres, 2020). Ademais os incêndios florestais devastam grandes áreas naturais todos os anos, ocasionando perdas econômicas para diversos setores da sociedade bem como a redução da biodiversidade, fragmentação florestal, poluição do ar e erosão do solo (Ramalho et al., 2021; Borrelli et al., 2015; Bond; Keeley, 2005).

Os incêndios florestais são influenciados principalmente pelas interações entre as condições da vegetação, clima, topografia e atividades antrópicas. O clima controla o nível de umidade da vegetação e sua quantidade disponível como combustível para o fogo. O uso do solo e topografia podem interferir na frequência e velocidade de propagação das chamas o que determina o tamanho das áreas queimadas (Torres, 2020).

No Brasil, os incêndios florestais possuem grande relação com as práticas de queimadas, que consistem no uso do fogo para queima periódica de vegetação densa ou resíduos florestais e agrícolas para o cultivo de novas culturas (Anderson, 2017). Segundo Soares e Santos (2002), os “incendiários” causam grande parte dos incêndios no Brasil, seja por vingança, desequilíbrio mental ou outro motivo. O Grupo de Trabalho Conjunto sobre Estatísticas, Economia e Gestão Florestal (ECE/FAO) também apontam que na Europa e África do Sul os incendiários são uma preocupação constante para os gestores públicos e das áreas florestais.

No estado do Espírito Santo foram registrados pelo sensor MODIS 4.196 focos de queimadas e incêndios entre os anos de 2008 e 2018. A dinâmica meteorológica do estado potencializa a ocorrência dos incêndios, principalmente em anos com escassez de chuvas e temperaturas médias elevadas que favorecem a propagação do fogo (Coelho; Gimenes; Goulart, 2020; Torres et al., 2016).

### **3.2 Áreas Protegidas**

A União Internacional para a Conservação da Natureza (UICN) define uma área protegida como um espaço geográfico bem definido que tem como objetivo a

conservação da natureza a longo prazo, manejada por meios eficientes, jurídicos ou de outra natureza (Bensusan, 2006). Essas áreas estão presentes em 80% dos países do mundo, cobrindo cerca de 11,5% da superfície terrestre planetária (Mulongoy; Chape, 2004).

No Brasil, a primeira proposta de criação dessas áreas ocorreu em 1876, com a sugestão preliminar de estabelecimento de parques segundo o modelo norte-americano. Porém, foi apenas em 1934 que foi instituída a figura de áreas destinadas à conservação com a criação do Código Florestal (Decreto nº 23.793). A partir da Constituição Federal de 1988 (art. 255), o país concebeu o mais importante instrumento de criação e gestão das áreas protegidas: a Lei nº 9.985/00 que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) (Bensusan, 2006; Brasil, 2000).

Os desafios do estabelecimento e gestão das áreas protegidas são questões fundamentais no entendimento do cenário atual e futuro da conservação da biodiversidade. Dentre os entraves estão os conflitos do uso da terra entre as comunidades locais e os interesses de conservação das áreas protegidas. Outro desafio é a falta de recursos financeiros e humanos por parte do poder legislativo e executivo (Prates; De Azevedo Irving, 2015).

### **3.2.1 Reserva Biológica de Sooretama e sua Zona de Amortecimento**

A ReBio de Sooretama, localizada entre os municípios de Linhares, Sooretama, Vila Valério e Jaguaré, criada em 1982, por meio do Decreto nº 87.588, é resultado da união da Reserva Estadual de Barra Seca e do Parque de Refúgio de Animais Silvestres Sooretama. O principal objetivo de sua criação foi a preservação de espécies remanescentes da Mata Atlântica, principalmente contra atividades conflitantes de caça, madeireiros, fazendeiros, a rodovia federal BR101 que atravessa a Reserva, desmatamento e o uso do fogo pelos proprietários vizinhos (Lopes, 2012; Mma, 2007).

Esta UC é de grande relevância por preservar o maior e mais bem conservado remanescente de ecossistemas da floresta atlântica de tabuleiros terciários contínuo (Icmbio, 2019). Sua riqueza biológica tem inúmeras semelhanças com a fauna amazônica, possuindo elevado número de espécies endêmicas (Icmbio, 2019).

Desde sua criação, a ReBio enfrentou dois grandes incêndios florestais, sendo um deles em 1998, que consumiu cerca de 2.500 ha da unidade, e outro em 2016,

queimando aproximadamente 2.000 ha de vegetação nativa. Ambos os eventos foram marcantes pela dificuldade de combate e sua origem antrópica (Silva et al., 2022). Segundo o Plano Operativo de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais, o histórico de zonas de calor indica maior concentração na ZA da ReBio, possuindo maior número de propriedades rurais que realizam atividades de queima de restos de cultivos.

### **3.3 Estratégias de prevenção contra os incêndios florestais**

A previsão e detecção antecipada dos incêndios florestais são primordiais para evitar os danos e reduzir os esforços de combate. Todos os anos são gastos milhões em esforços de gestão para reduzir ou parar os incêndios florestais. Logo, é essencial compreendê-los, assim como seus desencadeadores a fim de melhorar a proteção das florestas e o bem-estar da sociedade (Alkhatib et al., 2023; Borrelli et al., 2015).

Assim como o planejamento de qualquer atividade, os planos de combate aos incêndios florestais dependem dos objetivos a serem atingidos. Os planos podem contemplar todas as operações para a prevenção contra o fogo ou serem exclusivamente direcionados a atividades isoladas como detecção, pré-supressão, manejo do material combustível, queima controlada, supressão ou combate ao fogo propriamente dito (Ribeiro, 2004). Segundo o mesmo autor, a prevenção pode ser trabalhada individualmente em termos de planejamento, porém deve fazer parte de um plano maior, como, por exemplo, o Plano de Proteção contra Incêndios Florestais.

Os investimentos com ações preventivas são compensatórios quando comparado aos custos de combate, os quais envolvem esforço humano, desgaste de ferramentas, consumo de combustível com transporte e apoio, além das perdas ambientais (Da Silva, 2020). Um desses investimentos pode ser direcionado à construções de aceiros, que são faixas desprovidas de vegetação distribuídas na área florestal, que impedem que o fogo entre ou saia de determinada área (Sant'anna; Fiedler; Minette, 2007).

As ações contra os incêndios florestais serão mais eficazes quanto maior for o investimento (Pereira et al., 2006; Ribeiro, 2004). Entre as principais estratégias que podem ser inventivas, podemos citar a educação ambiental, zoneamento de incêndios, vigilância ou patrulhamento, equipamentos, manejo do material

combustível, legislações aplicáveis, formação de parcerias e montagem e alimentação de um banco de dados (Fiedler et al., 2020b; Pereira et al., 2006; Ribeiro, 2004).

### **3.4 Geotecnologias aplicada aos incêndios florestais**

O ser humano tem buscado cada vez mais o desenvolvimento de novas tecnologias que visam facilitar tarefas e solucionar problemas. Dessa forma, a partir da coleta, armazenamento, análise e interpretação de dados espaciais, que representam a superfície terrestre, pode-se manejar os recursos naturais de forma mais acurada e eficiente. Esse conjunto de técnicas, denominadas de Geotecnologias, tem sido cada vez mais utilizado para modelar o risco de incêndios florestais (You et al., 2017; White et al., 2016).

Dentre os vários métodos de monitoramento existentes, o uso das Geotecnologias é uma alternativa de baixo custo, de alta eficiência e precisão que propicia uma ampla visão sobre a distribuição temporal e espacial das queimadas em diferentes escalas, além de possibilitar análises das interações do fogo relacionado com fatores climáticos, culturais e socioambientais. O Sensoriamento Remoto trouxe grandes avanços no monitoramento dos incêndios no mundo nos últimos anos, incluindo satélites que permitem detectar fumaças e áreas de queimadas ativas como QuickBird, IKONOS, SPOT, CBERS e LANDSAT e outros como NOAA e MODIS que detectam focos de calor que são potenciais pontos de ignição (Fiedler et al., 2020b; Prudente, 2010).

#### **3.4.1 Lógica *Fuzzy***

A lógica *Fuzzy* é uma ferramenta computacional com grande potencial na ajuda de decisões humanas para problemas complexos, que não podem ser resolvidos com simples respostas de “sim” ou “não”. Ela elimina a subjetividade, traduzindo valores qualitativos em quantitativos em um intervalo de 0 a 1, gerando respostas intermediárias, que representam graus de verdade (Ramalho et al., 2021; Juvanhol et al., 2021).

A lógica *Fuzzy*, integrada aos Sistemas de Informação Geográfica pode ser utilizada na tomada de decisão em estudos ambientais, incluindo a modelagem de risco de incêndios florestais. Diversos autores utilizaram a modelagem *Fuzzy* como metodologia em seus trabalhos, como Aragão et al. (2023), Juvanhol et al. (2021) e Mota et al. (2019). no zoneamento de risco de incêndios. O autor Ramalho et al.

(2021) na localização otimizada de poços de captação de água e Eugenio et al. (2016) em alocação de torres de observação.

### **3.5 Mapeamento de material combustível**

Os estudos que avaliam em larga escala as condições do material combustível são relevantes para várias aplicações de pesquisa e gestão, uma vez que o combustível é um componente da paisagem relacionado aos incêndios e que pode ser gerenciado pelo ser humano. A compreensão da sua distribuição espacial é importante para observar o risco de incêndio e fornecer medidas de controle estratégicas de redução de combustível (Leavesley; Van Dijk; Yebra, 2018).

Dentre os métodos de mapeamento de material combustível, podemos citar os convencionais, que consistem em pesquisas de campo que envolvem o reconhecimento in loco, tendo como principal vantagem o mapeamento a partir de condições reais observadas no terreno. Embora essa técnica tenha sido bem-sucedida no passado, os altos investimentos em tempo e capital tornam a sua prática cada vez mais inviável para muitos pesquisadores (Falkowski et al., 2005).

O sensoriamento remoto vem sendo aplicado em vários aspectos da ciência e gestão dos incêndios florestais, incluindo estimativa de combustível (Arroyo; Pascual; Manzanera et al., 2008). Dentre as principais vantagens podemos citar: o fácil acesso a custo razoável; análise de mudanças temporais e integração de informações; e avaliação rápida das condições do combustível que causam incêndios em grande escala (Mutlu et al., 2008; Falkowski et al., 2005).

#### **3.5.1 Análise de Mistura Espectral**

A Análise de Mistura Espectral (AME) é uma técnica utilizada no processamento das imagens de satélite, que identifica alvos menores que a resolução da imagem e permite conhecer suas proporções na paisagem (Shimabukuro; Dutra; Arai, 2020). Essa técnica permite classificar uma imagem orbital que contém pixels com uma mistura de materiais da superfície terrestre como solo, água, vegetação e outros. Podendo ocorrer quando os objetos são menores que a resolução do pixel (Heimes, 1977; Horwitz, 1971). Dessa forma, a detecção dos diferentes constituintes presentes na mistura é importante para minimizar os erros na estimativa de áreas na classificação automática (Shimabukuro; Dutra; Arai, 2020).

No Brasil esse procedimento foi implementado principalmente a partir da cooperação entre o Brasil e Alemanha no projeto Cerrado-Jalapão com o intuito de prevenir, controlar e monitorar as queimadas irregulares e incêndios florestais no Cerrado com ações de Manejo Integrado do Fogo (MIF) (Orozco Filho, 2019; Franke et al., 2018).

Os autores Quintano, (2017) e Smith et al. (2007) afirmaram em seus estudos que a AME é vantajosa na detecção de áreas queimadas em relação aos métodos baseados em índices de vegetação, concluindo que foi a melhor abordagem utilizada em seus resultados. As pesquisas de Shimabukuro et al. (2019) conseguiram mapear áreas queimadas no estado do Mato Grosso.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi elaborado na Reserva Biológica de Sooretama, localizada no norte do estado do Espírito Santo entre as coordenadas em graus decimais Lat: - 19.013312° e Long: - 40.123218° (LOPES, 2012) (Figura 1).

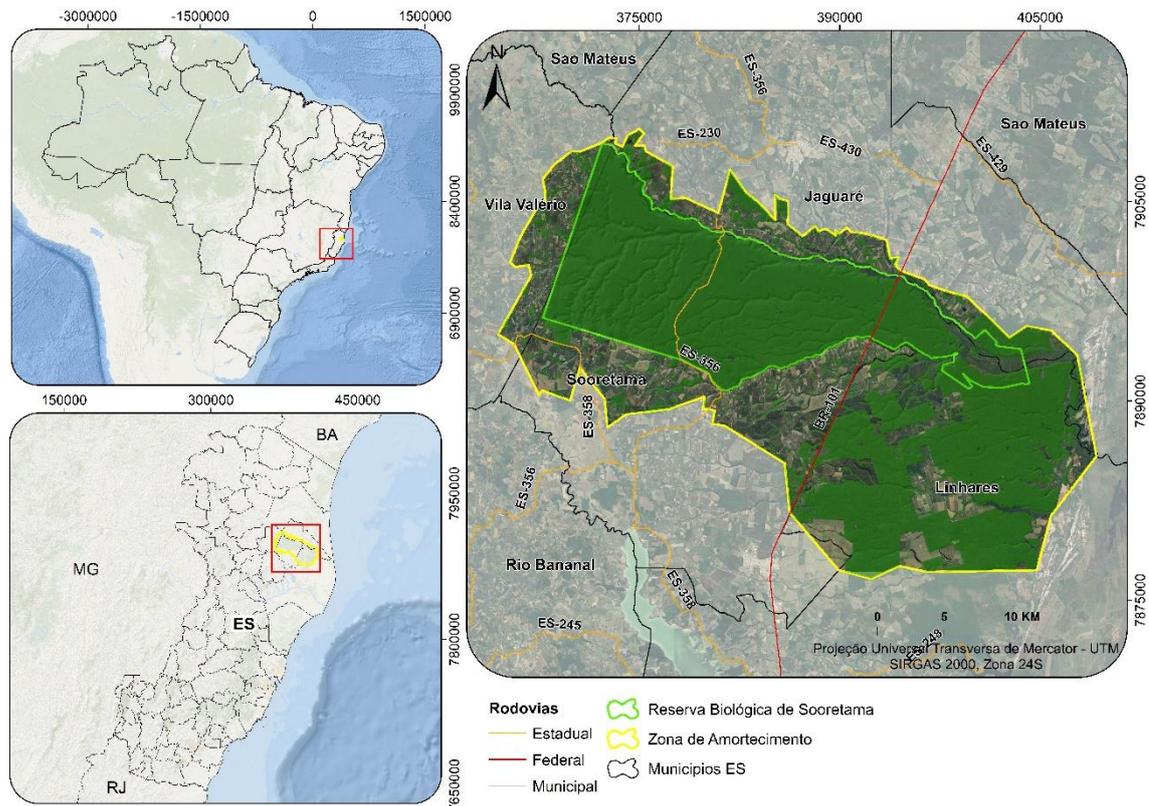


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo. Reserva Biológica de Sooretama e Zona de Amortecimento, Espírito Santo, Brasil.

Fonte: O autor.

A área total é de 27.859 ha de superfície. O clima Segundo Köppen é classificado como “Aw” (tropical chuvoso, com estação seca no inverno), com precipitação média anual de 1.178 mm, temperatura média anual de 23,6 °C e variação de altitude entre 5 a 197 metros (Alvares et al., 2013).

### 4.2 Procedimento metodológico

Para a delimitação dos locais prioritários de abertura de aceiros foi utilizada a técnica de sensoriamento remoto denominada de ‘Análise de Mistura Espectral’ para estimar a distribuição espacial do material combustível na área de estudo. A modelagem *Fuzzy* foi desenvolvida em conjunto com a AME, resultando na criação de um mapa de Zoneamento de Risco de Incêndios Florestais a partir da

observação de variáveis que afetam o comportamento do fogo (Aragão et al., 2023; Ramalho, 2022).

#### 4.2.1 Zoneamento de Risco de Ocorrência de Incêndio Florestal

Para elaboração do zoneamento de risco de ocorrência de incêndio florestal, as seguintes variáveis físicas, ambientais e socioeconômicas foram definidas: uso e ocupação da terra (UOT), zonas de calor, médias anuais de precipitação e temperatura, temperatura da superfície terrestre, altitude e proximidade a malha viária. As etapas necessárias para gerar o mapa de risco de incêndios florestais para ReBio de Sooretama e sua ZA estão descritas na Figura 2.

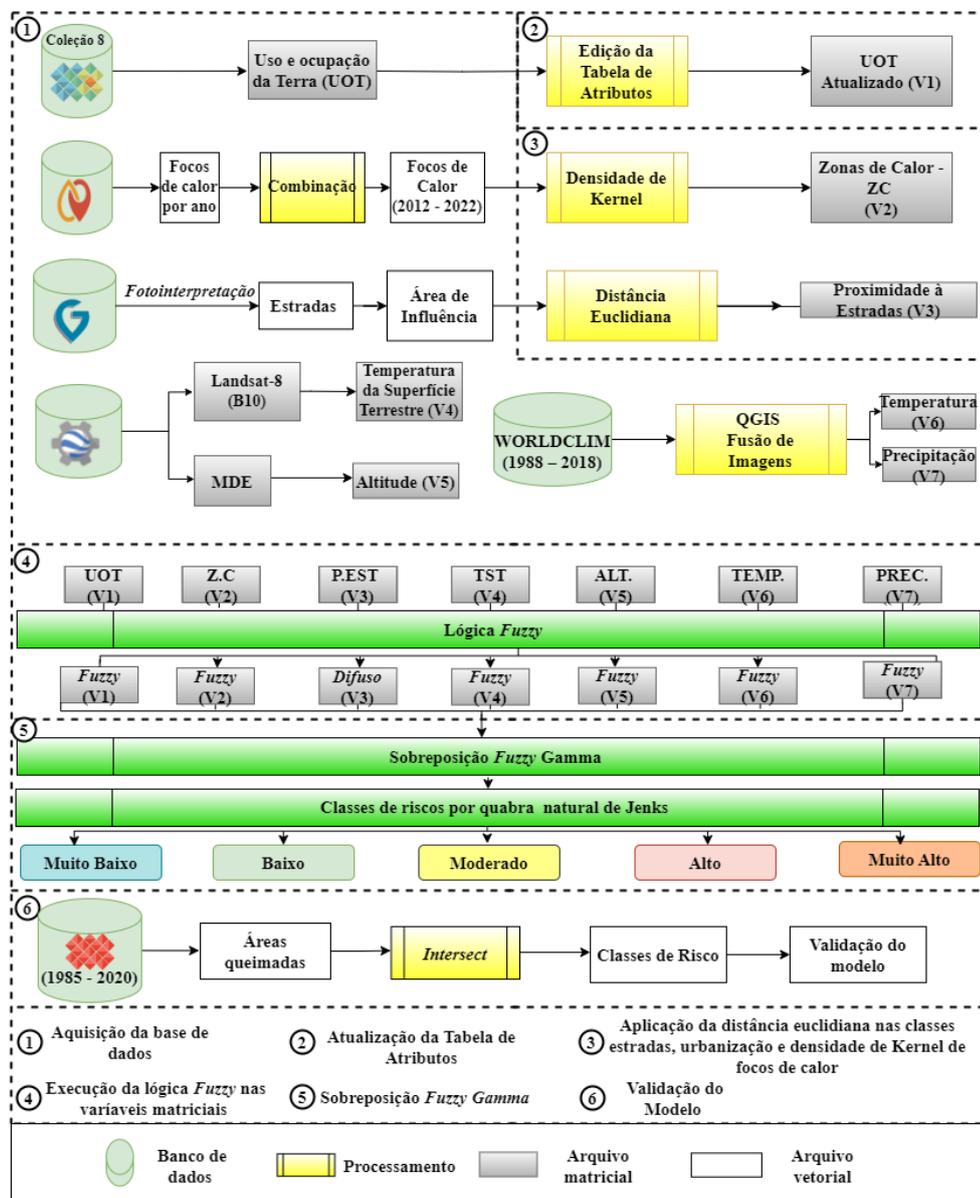


Figura 2 – Fluxograma metodológico das etapas de elaboração do mapa de risco de incêndio florestal da Reserva Biológica de Sooretama e sua Zona de Amortecimento. Onde, UOT é o Uso e Ocupação da Terra, ZC são as Zonas de Calor, PEST é a

Proximidade das Estradas, TST é a Temperatura da Superfície Terrestre, ALT é a Altitude, TEMP é a Temperatura do Ar e PREC é a Precipitação.

Fonte: O autor.

#### **4.2.2 Aquisição da Base de dados**

O mapeamento de Uso e Ocupação da Terra (UOT) foi obtido da coleção oito do ano de 2022 do projeto de mapas da cobertura e uso do solo no Brasil (MapBiomas). Os dados de precipitação e temperatura do ar foram baseados na média aritmética da série histórica de 30 anos (1988 – 2018), obtidos na plataforma *WORLDCLIM*. Esses dados foram submetidos ao processo de fusão de imagens no software *QGIS*® versão 3.22.4 e reajustadas para 30 metros com o uso da ferramenta “*Resample*” do *ArcGIS*® 10.5. Os dados para a Temperatura da Superfície da Terra (TST) foram obtidos da média aritmética das imagens Landsat-8, referente a banda de Infravermelho Termal (B10) do sensor *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), por meio da reprodução da metodologia dos autores Jesus e Santana (2017) na plataforma *Google Earth Engine* no período de 2013 a 2020. Para elaboração do mapa de zonas de calor, foram utilizados dados pontuais de focos de calor, detectados no período de dez anos (2012 a 2022), oriundos do satélite referência AQUA e disponível na plataforma BDQueimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

O mapa de altitude foi obtido utilizando o Modelo Digital de Elevação (MDE) da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), com 30 metros de resolução, por meio da plataforma *Google Earth Engine* e processado no software *ArcGIS*® 10.5. A malha viária foi realizada pela técnica de fotointerpretação, sendo classificada em primárias (com vias pavimentadas e maior circulação de veículos), secundárias (não pavimentadas que ligam as primárias às terciárias e terciárias (estradas rurais utilizadas para dar acesso as atividades agrícolas, silviculturais e pequenas propriedades).

#### **4.2.3 Atualização da tabela de atributos (UOT)**

O arquivo original do UOT foi recortado para a área de estudo com o uso da ferramenta “*Extract by Mask*” e reclassificado no software *ArcGIS*® 10.5, realizando a junção de classes semelhantes para o risco e alterando o número e nomenclatura das classes da Tabela de atributos (Ramalho, 2022).

#### 4.2.4 Aplicação da distância euclidiana nas classes de estradas e densidade de Kernel de focos de calor

O arquivo da malha viária foi submetido a análise da distância euclidiana. Esse método permitiu obter e classificar os valores das distâncias das estradas e sua influência no risco de ocorrência de incêndios (LeaL, 2019). As intensidades das zonas de calor foram estimadas por meio da densidade de Kernel. Essa Função estima a densidade de amostras com multivariações ou não, em uma determinada área e pode ser expressa pela equação 1 (Ergamaschi; Coelho; Cgeo, 2010).

$$Density = \frac{1}{(radius)^2} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{3}{\pi} \cdot pop_i \left( 1 - \left( \frac{dist_i}{radius} \right)^2 \right)^2 \right] \quad (1)$$

For  $dist_i < radius$

Em que:

$i = 1, \dots, n$  são os pontos de entrada.

$pop_i$  é o valor do campo de população do ponto  $i$ , que é um parâmetro opcional.

$dist_i$  é a distância entre o ponto  $i$  e o local  $(x, y)$ .

#### 4.2.5 Fuzzificação das variáveis analisadas

No processo de *fuzzificação* as variáveis de interesse foram convertidas em um sistema de conjuntos *Fuzzy* e receberam uma função de pertinência de acordo com sua influência sob o fogo. A modelagem da influência da densidade de Kernel das zonas de calor foi inferida pela função de pertinência *Fuzzy Linear crescente*, onde o valor máximo foi representado pelos locais de maior densidade de focos de calor e o mínimo, os locais de menor densidade de focos de calor. A variável do UOT recebeu a função *Fuzzy Linear crescente*. O critério de escolha desta função de pertinência se deu pelo uso das cicatrizes de incêndios na área de estudo entre os anos de 1985 a 2022, onde as variáveis de interesse foram cruzadas espacialmente com as áreas queimadas pela ferramenta “*intersect*” no *software* ArcGis®, versão 10.5 (Aragão et al., 2023; Biazatti et al., 2021). Assim, foram ranqueadas as classes de influência de cada variável sobre o risco de incêndios florestais, sendo que as com maior porcentagem de áreas sobrepostas com as cicatrizes de incêndios receberam maior peso no conjunto *Fuzzy* (Tabela 1).

Tabela 1 – Reclassificação do Uso e Ocupação da Terra de acordo com a influência sobre os riscos de incêndios florestais

Classe de UOT	Valor reclassificado	Influência no risco	% de Área queimada (1985 a 2022)
Outras formações não florestais, Massa d'água e área não vegetadas	1	Muito Baixo	0,84
Restinga	2	Baixo	1,38
Formação Florestal	3	Moderado	9,25
Silvicultura	4	Alto	10,77
Pastagem	5	Muito Alto	19,15
Formação Herbácea Inundável e Formação Herbácea Inundada	6	Muito alto	19,35
Agricultura	7	Muito alto	39,27

Fonte: Adaptado de Aragão et al, (2023) e Biazatti et al. (2021).

Em relação a influência da proximidade da malha viária, foi aplicada a *Fuzzy Linear Decrescente*, baseado na relação entre a distância dessa variável e a possibilidade de ocorrência de incêndios florestais. Sendo que quanto mais próximo das áreas naturais, maior a sua influência sobre o risco de incêndios (RIBEIRO et al., 2008). Na variável de altitude foi usada a função de pertinência a *Fuzzy Linear Decrescente*. Esse critério se baseou no conceito de quanto menor a altitude maior a temperatura do ar, aumentando o risco de incêndios (Ribeiro et al., 2008; Oliveira, 2002). Na precipitação foi usada a função de pertinência *Fuzzy Linear Decrescente*, pois locais com menores precipitações, possui maior potencial de ocorrência e propagação dos incêndios (Eugenio et al., 2016). A Tabela 2 demonstra a influência das classes de altitude a precipitação sob o risco de ocorrência de incêndios florestais.

Tabela 2 – Risco de ocorrência de incêndios florestais de acordo com a altitude e precipitação.

Classes de altitude (m)	Influência no risco
> 1.500	Muito baixo
1.200 – 1.500	Baixo
900 – 1.200	Moderado
600– 900	Alto
< 600	Muito alto
Precipitação (mm)	Influência no risco
≥ 1300	Muito Baixo
1200,1 – 1300	Baixo
1100,1 – 1200	Moderado
1000,1 – 1100	Alto
< 1000	Muito alto

Fonte: Adaptado de Aragão et al, (2023) e Eugenio et al. (2016).

As influências das variáveis de temperatura do ar e temperatura da superfície terrestre foram determinadas a partir da função *Fuzzy Linear crescente*, visto que maiores temperaturas em ambas as variáveis aumentam o risco da ocorrência de incêndios como definido na Tabela 3. (Eugenio et al., 2016).

Tabela 3 – Risco de ocorrência de incêndios florestais de acordo com a temperatura do ar e da superfície terrestre

Temperatura do ar (°C)	Influência no risco
< 18	Muito Baixo
18,01 – 20	Baixo
20,01 – 22	Moderado
22,1 – 24	Alto
> 24,1	Muito Alto
Temperatura da superfície terrestre (°C)	Influência no risco
< 20,0	Muito baixo
20,0 – 25,0	Baixo
25,1 – 30,0	Moderado
30,1 – 35,0	Alto
> 35,0	Muito alto

Fonte: Adaptado de Aragão et al, (2023); Ramalho (2022) e Mota et al. (2019).

#### 4.2.6 Sobreposição Fuzzy Gamma

Ao modelar o risco de incêndio no ambiente SIG, os efeitos das variáveis estudadas na ignição e propagação de incêndios foram combinados por meio de

uma análise de sobreposição, que indicou a probabilidade da célula do arquivo matricial das variáveis, seja pertencente ao conjunto *Fuzzy* de outras variáveis de múltiplos critérios de entrada. Para o empilhamento dos arquivos rasters foi realizada a sobreposição *Fuzzy*, utilizando o operador *Fuzzy Gamma*. A *Fuzzy Gamma* é um produto algébrico de Produto *Fuzzy* e Soma *Fuzzy*, ambos elevados à potência de gama conforme a equação 2 (ESRI, 2021).

$$\mu_{(x)} = \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right\}^y \times \left( \prod_{i=1}^n \mu_i \right)^{1-y} \quad (2)$$

Em que:

$\mu_i$ : valores de associação difusa para  $i = 1, 2 \dots 7$ ;

n: número de variáveis no estudo;

y: valor de coeficiente padrão (0,9).

Em seguida, o produto gerado da junção de cada variável foi reclassificado pelo método das quebras naturais de Jenks em cinco classes de risco: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto (Ramalho et al., 2023).

#### 4.2.7 Validação do Modelo

O procedimento adotado para a validação do modelo foi o mesmo utilizado pelos autores Aragão et al. (2023), onde os dados históricos de áreas queimadas no intervalo entre 1985 a 2022 da área de estudo foram cruzados espacialmente com cada classe de risco através da ferramenta “*intersect*” do *software* ArcGIS® 10.5. Os dados de áreas queimadas consistem na coleção de mosaicos de imagens dos satélites Landsat com resolução espacial 30 metros disponibilizados pelo MapBiomas.

#### 4.2.1 Mapa de Distribuição de Material Combustível

O mapa de distribuição de material combustível foi desenvolvido utilizando a metodologia proposta por Franke et al. (2018), através do script elaborado e disponibilizado pela Divisão de Monitoramento e Informações Ambientais do ICMBio na plataforma Google Earth Engine (GEE). Primeiramente foram estabelecidos três componentes da paisagem presentes na área de estudo, sendo eles vegetação verde, vegetação seca/morta e solo exposto. A AME estimou a distribuição de vegetação verde, vegetação seca/morta e solo exposto (Borges et al., 2021).

#### 4.2.2 Análise de Mistura Espectral

Para estimar as proporções de vegetação verde, vegetação seca/morta e solo exposto foram utilizadas as bandas: B02 (azul), B03 (verde), B04 (vermelho), B08 (infravermelho próximo - NIR) com 10m de resolução espacial e as bandas 11 e 12 (infravermelho de ondas curtas - SWIR) com 20m de resolução do satélite Sentinel-2. O conjunto de bandas foram reamostradas a partir da operação da mediana pelo script no GEE para uma resolução de 10 m.

O período de coleta dos dados, foi realizado durante a estação seca do mês de julho de 2023, momento recomendado para a produção do mapa de distribuição de combustível pois é possível monitorar a real situação do material combustível (Asner et al., 2005; Roberts et al., 2003). Essa técnica possibilitou a identificação dos alvos de interesse misturados no pixel das imagens do satélite Sentinel-2, como ilustrado na Figura 3.

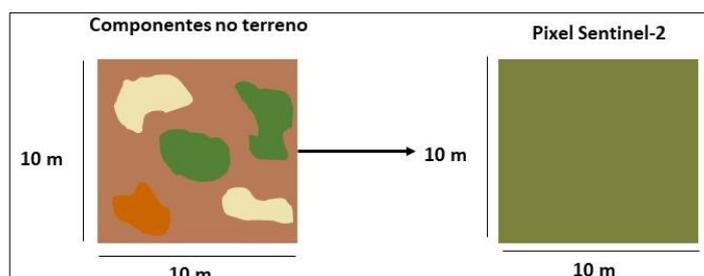


Figura 3 – Mistura espectral de diferentes alvos em um pixel.

Fonte: O autor

O script utiliza como base uma assinatura espectral de referência ou “*endmembers*”. Os “*endmembers*” são pixels puros, logo, são valores reais dos componentes da paisagem detectados pelo satélite.

As amostras dos “*endmembers*” de cada um dos três componentes (vegetação verde, vegetação seca/morta e solo exposto) da área de estudo estão apresentadas na Figura 4 (Kruse et. Al., 1993). Para captar amostras com refletâncias reais, as imagens foram corrigidas automaticamente pelo algoritmo do script para eliminar interferências atmosféricas nas ondas eletromagnéticas emitidas e captadas pelo satélite (Franke et al. 2018).

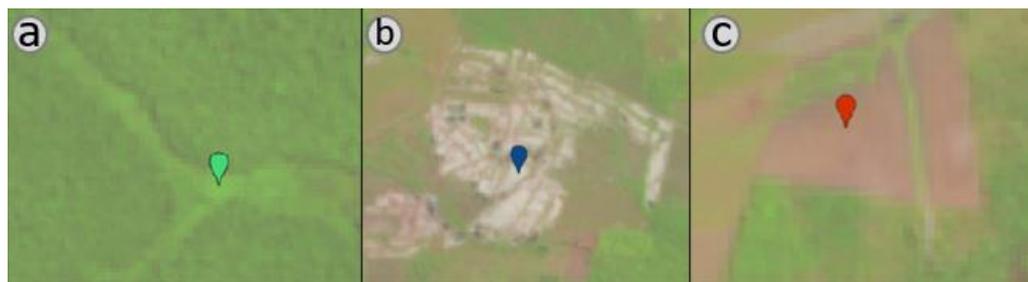


Figura 4 – Endmembers de vegetação verde (a), solo exposto (b) e vegetação seca (c) plotados do visualizador de layers do *Google Earth Engine*.

Fonte: O autor

O algoritmo script resolve um sistema de equações lineares para determinar a proporção de cada componente presente nos pixels. A partir do processamento da AME foram geradas três imagens fração para cada um dos três componentes. Assim, quanto maior o brilho (tons de cinza mais claros) maior a proporção daquele componente no pixel. Inversamente, quanto mais escuro o pixel menor a proporção daquele componente no pixel conforme Figura 5. O mapa final de distribuição de material combustível resultou da composição RGB das três imagens fração, como demonstrado na Figura 5.

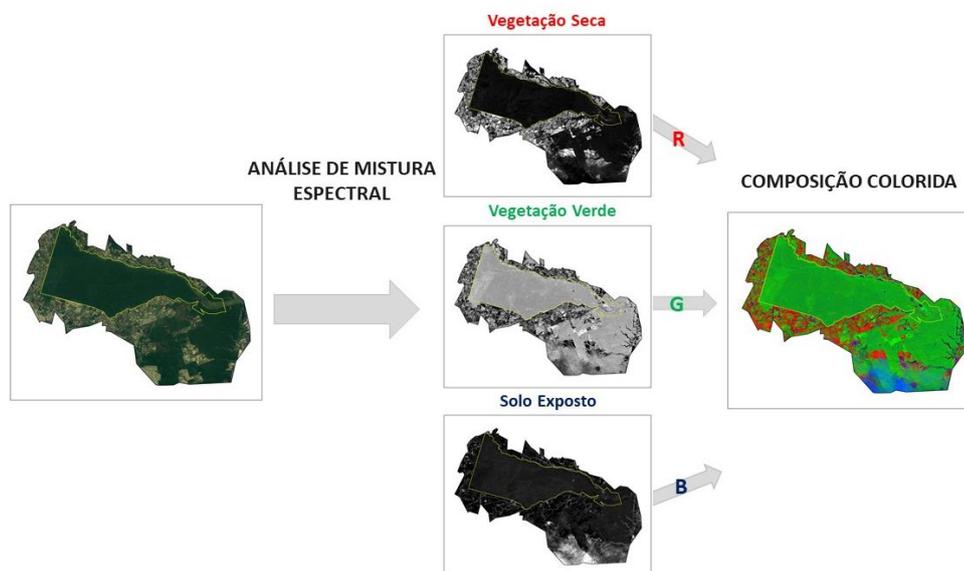


Figura 5 – Etapas do processamento do mapa de distribuição de material combustível.

Fonte: Adaptado de BORGES et al., 2021.

Após a geração do arquivo raster de distribuição de material combustível foi preciso transformá-lo em vetor, para proceder com os cálculos de áreas e demais análises. A vetorização foi realizada no *plugin* “*Threshold Vectorization*” no software

QGIS Desktop, versão 3.22.4. O “*Threshold Vectorization*” promoveu o processamento baseado nos valores dos pixels que compõe cada cena nas três bandas fração geradas pelo modelo (vegetação verde, seca e solo exposto) demonstradas na Figura 9 (Rotunno, 2019).

#### **4.2.3 Validação das assinaturas espectrais dos *endmembers***

Para garantir que as amostras de vegetação seca, vegetação verde e solo exposto foram confiáveis e representativas da área de estudo, foi gerado um gráfico de assinaturas espectrais, que demonstra o comportamento típico de cada componente, principalmente as diferenças que ocorrem devido a diferença de radiação eletromagnética refletida das folhas em relação a quantidade do seu conteúdo de água (Franke et al. 2018; Qi et al., 2014; Knipling, 1970).

#### **4.3 Delimitação de áreas prioritárias para construções de aceiros**

Para definir as áreas prioritárias foi aplicada a análise de sobreposição espacial dos dados gerados a partir do ZROIF e distribuição de material combustível. As informações espaciais interseccionadas utilizadas para delimitar as áreas prioritárias foram: áreas de vegetação seca e classes de risco de incêndio alto e muito alto da ReBio de Sooretama e sua ZA.

A partir das áreas prioritárias definidas, foram delimitadas as áreas destinadas a construção de aceiros. A representação visual das faixas para a construção dos aceiros foi definida nas regiões marginais das áreas prioritárias. Foram empregados *Buffers* internos no ArcGIS® 10.5 de 15 m de largura para as regiões de risco alto e 30 m para as áreas de prioridade muito alto (Brasil, 2023; Brasil, 2018; Rocha et al., 2013; Soares, 2000).

##### **4.3.2 Áreas impróprias para a construção de aceiros**

Para assegurar a confiabilidade e aplicabilidade dos resultados gerados pelo método proposto, foram impostas restrições que constituíram na exclusão de áreas consideradas inadequadas para a implementação de aceiros. Essa medida foi essencial para prevenir que as regiões identificadas como prioritárias pelo modelo não propiciassem a remoção de vegetação nativa das no qual tem papel de conservação da biodiversidade local. Além das áreas florestais, os arquivos que compuseram as áreas impróprias foram: solo exposto, massa d'água e malha viária. Nesses ambientes ocorre uma redução do material combustível, sendo considerados barreiras naturais (Zong; Tian; Wang, 2021; Ramalho, 2022).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Zoneamento de Risco de Ocorrência incêndios florestais

#### 5.1.2 Variáveis analisadas no modelo

As Figuras 6 e 7 apresentam a distribuição espacial e as proporções das classes das variáveis avaliadas que compuseram o banco de dados do modelo.

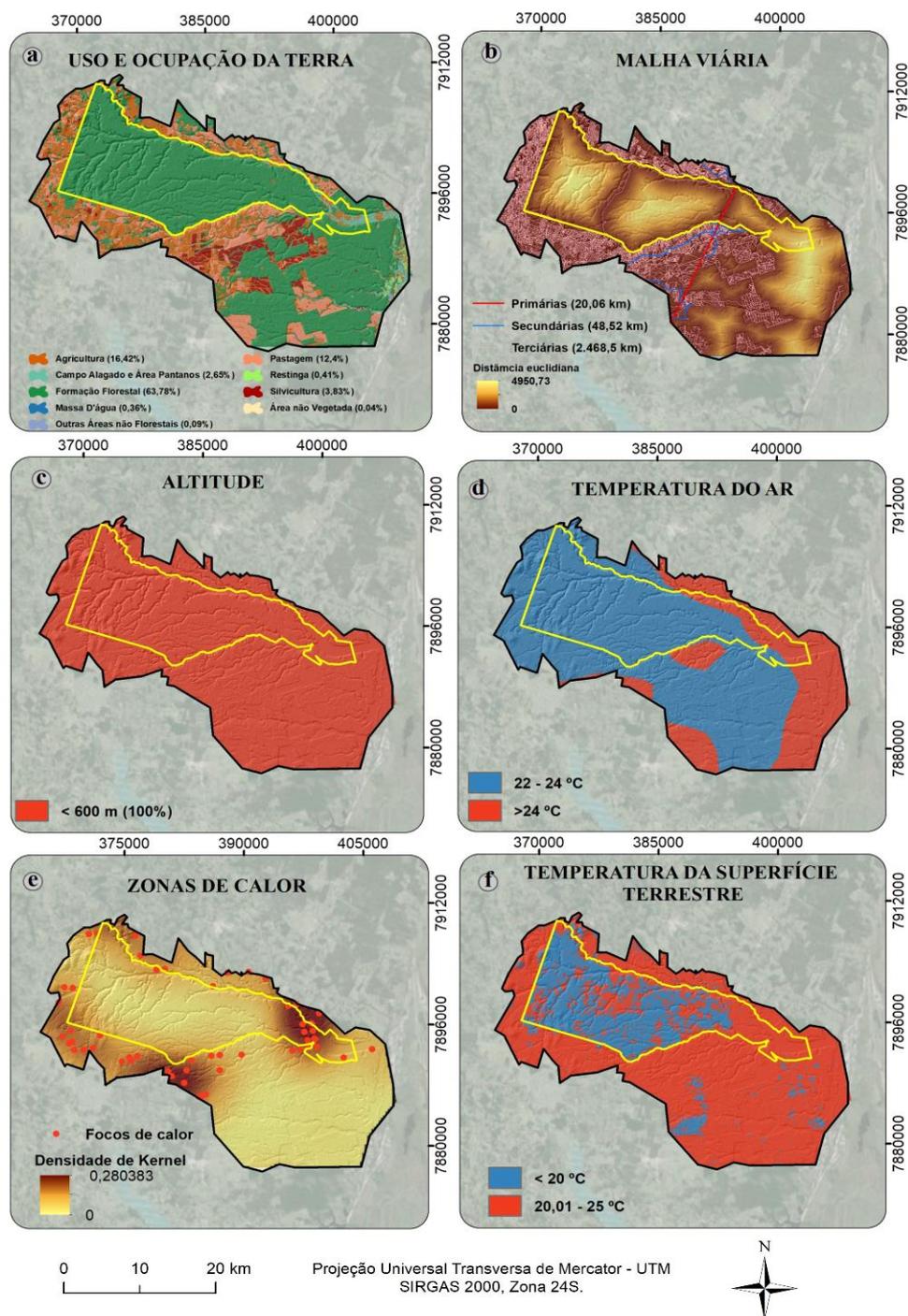


Figura 6 – Distribuição espacial das variáveis analisadas na Reserva Biológica de Sooretama e Zona de Amortecimento.

Fonte: O autor.

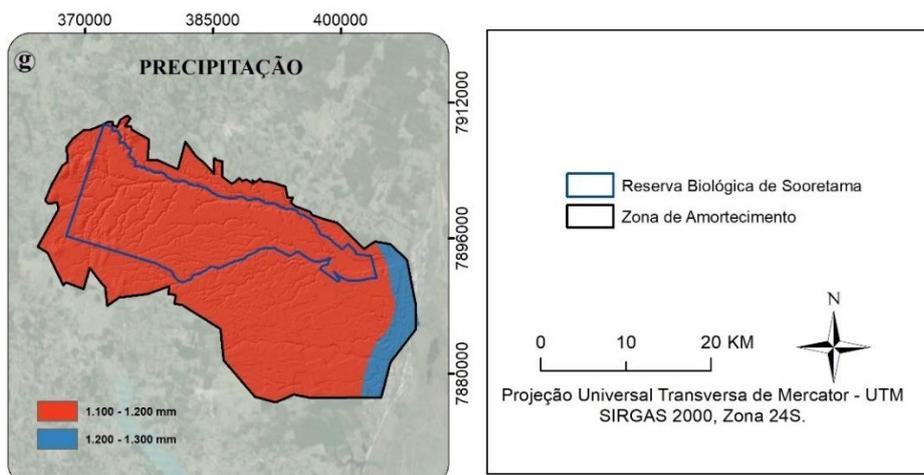


Figura 7 – Distribuição espacial das variáveis analisadas na Reserva Biológica de Sooretama e Zona de Amortecimento.

Fonte: O autor.

O uso predominante do solo baseia-se na formação florestal, representando 63,78% da área de estudo, seguido de atividades agrícolas (16,42%), pastagem (12,4%) e silvicultura (3,83%), conforme demonstrado na Figura 6a. As áreas de formação florestal fazem parte das florestas de tabuleiro que ocupam os terrenos planos da ReBio de Sooretama. Apesar do forte processo de antropização como atividades de agricultura presentes na ZA, a extensão das florestas de tabuleiro permanece marcante na paisagem, o que pode ser explicado pela presença da Reserva Natural da Vale nas proximidades, que preserva boa parte desse remanescente florestal (Icmbio, 2019).

A malha viária totalizou 2.537,08 km de extensão, divididas em primárias totalizando 20,06 km, secundárias com 48,52 km e as terciárias que constituíram a maior porção de estradas com 2.468,5 km. A presença de estradas é um causador de impactos negativos para a ReBio de Sooretama, pois impõem efeitos de fragmentação nos habitats e atropelamentos da fauna (Icmbio, 2019). Mas a partir da adoção de medidas mitigadoras, como passagens para a fauna, barreiras e cercas e corredores ecológicos, as estradas em situações de emergências, são de extrema importância no deslocamento das equipes de combate até os locais desejados, além de vigilância em locais mais críticos (Fiedler et al., 2020b).

A temperatura do ar variou entre as faixas de 22 °C a 24 °C correspondendo a 73% da área. Já os 27% restantes representam áreas com temperatura >24 °C. A temperatura da superfície terrestre apresentou duas faixas de temperatura, sendo

valores  $<20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em 23,23% e de  $20,01\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  em 76,78% da área de estudo. Em relação a precipitação acumulada, 94,06% da ReBio apresentou valores entre 1100 mm e 1200 mm e 5,94% com chuvas  $>1200\text{ mm}$ .

O levantamento da série histórica de zonas de calor, demonstrou a ocorrência de 60 focos entre os anos de 2012 a 2022. Observou-se que as maiores incidências ocorreram na ZA da ReBio. Porém foram registradas dez zonas de calor dentro dos limites da ReBio conforme apresentado na Figura 6e. De acordo com os resultados, percebe-se que nos últimos anos a ZA foi mais suscetível a fatores que provocam a detecção de zonas de calor, incluindo atividades humanas, como agricultura e queimadas controladas (Mengue, 2022; Anderson, 2017).

### 5.1.3 Análise do Zoneamento de Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais

As Figuras 8 e 9 demonstram a influência de cada variável sobre o risco de incêndios florestais para a ReBio e sua ZA após o processo de “fuzzyficação”.

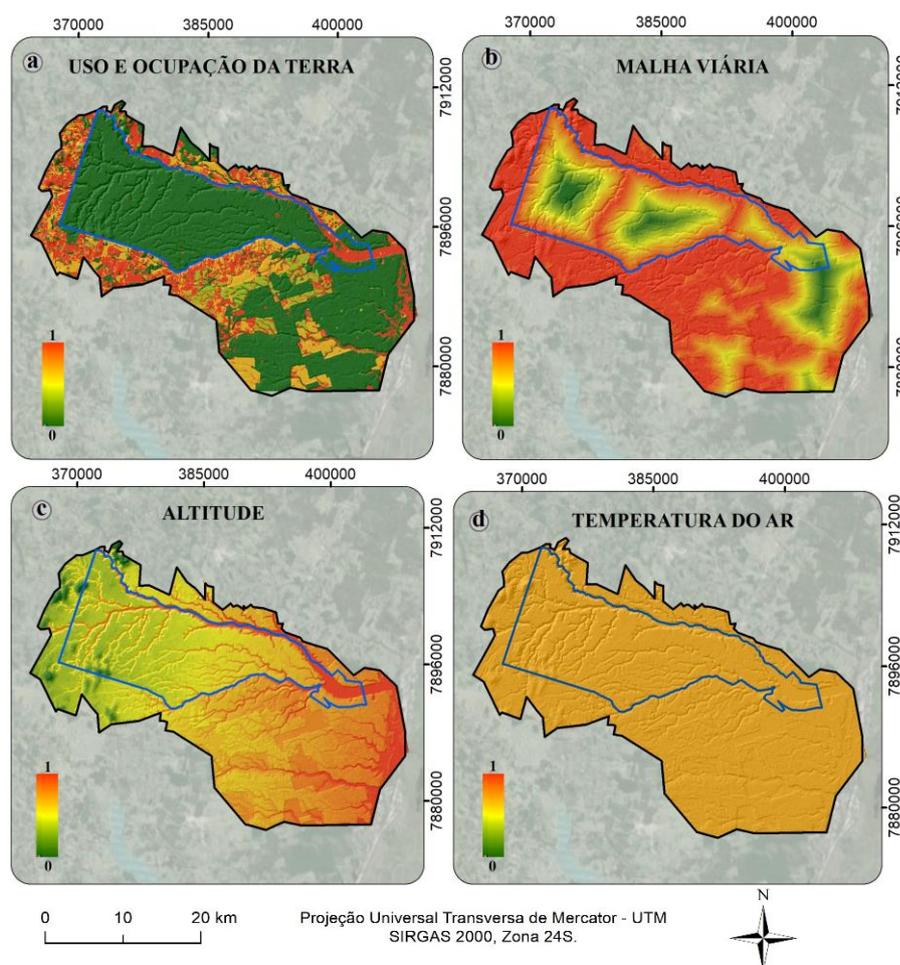


Figura 8 – Influência das variáveis sobre as classes de risco de incêndios florestais.

Fonte: O autor.

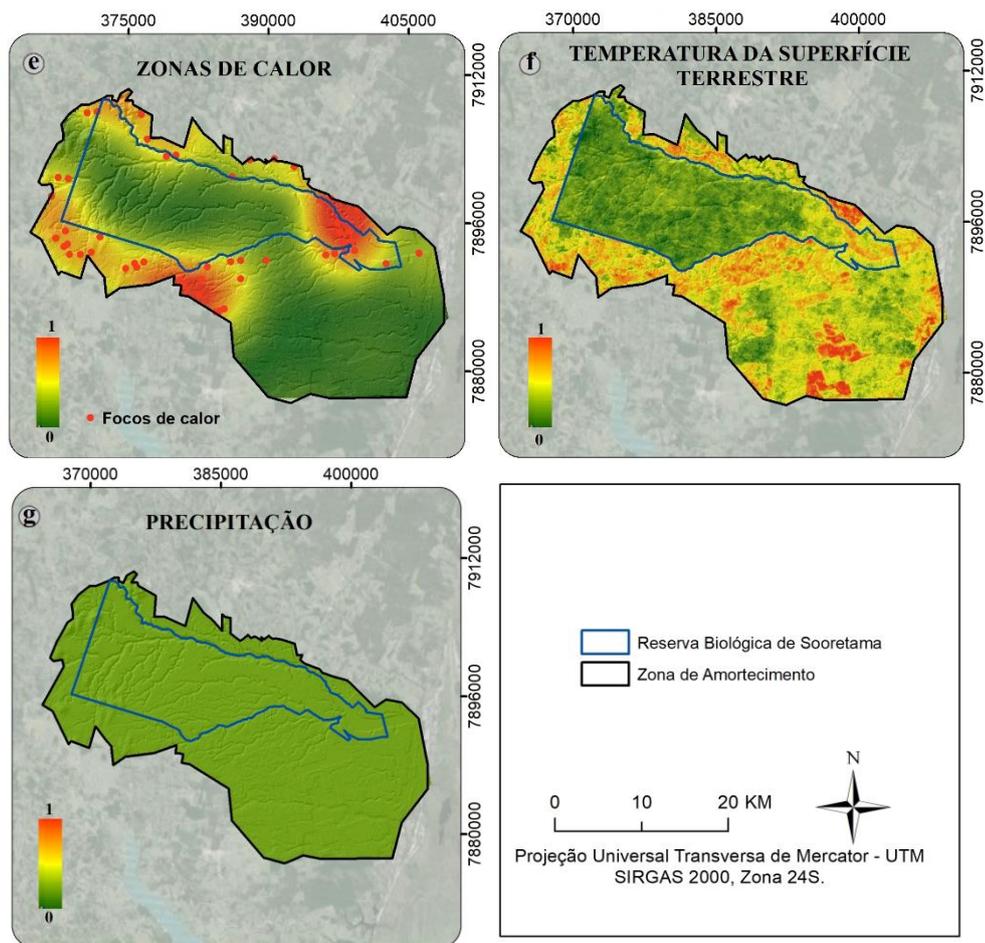


Figura 9 – Influência das variáveis sobre as classes de risco de incêndios florestais.

Fonte: O autor.

A partir dos dados encontrados na modelagem do risco de ocorrência de incêndios florestais para a ReBio de Sooretama e sua ZA, compreende-se que a área é predominantemente formada pelas classes de risco de incêndios moderado (32,76%), alto (25,67%) e muito alto (25,2%) conforme demonstrado na Figura 10.

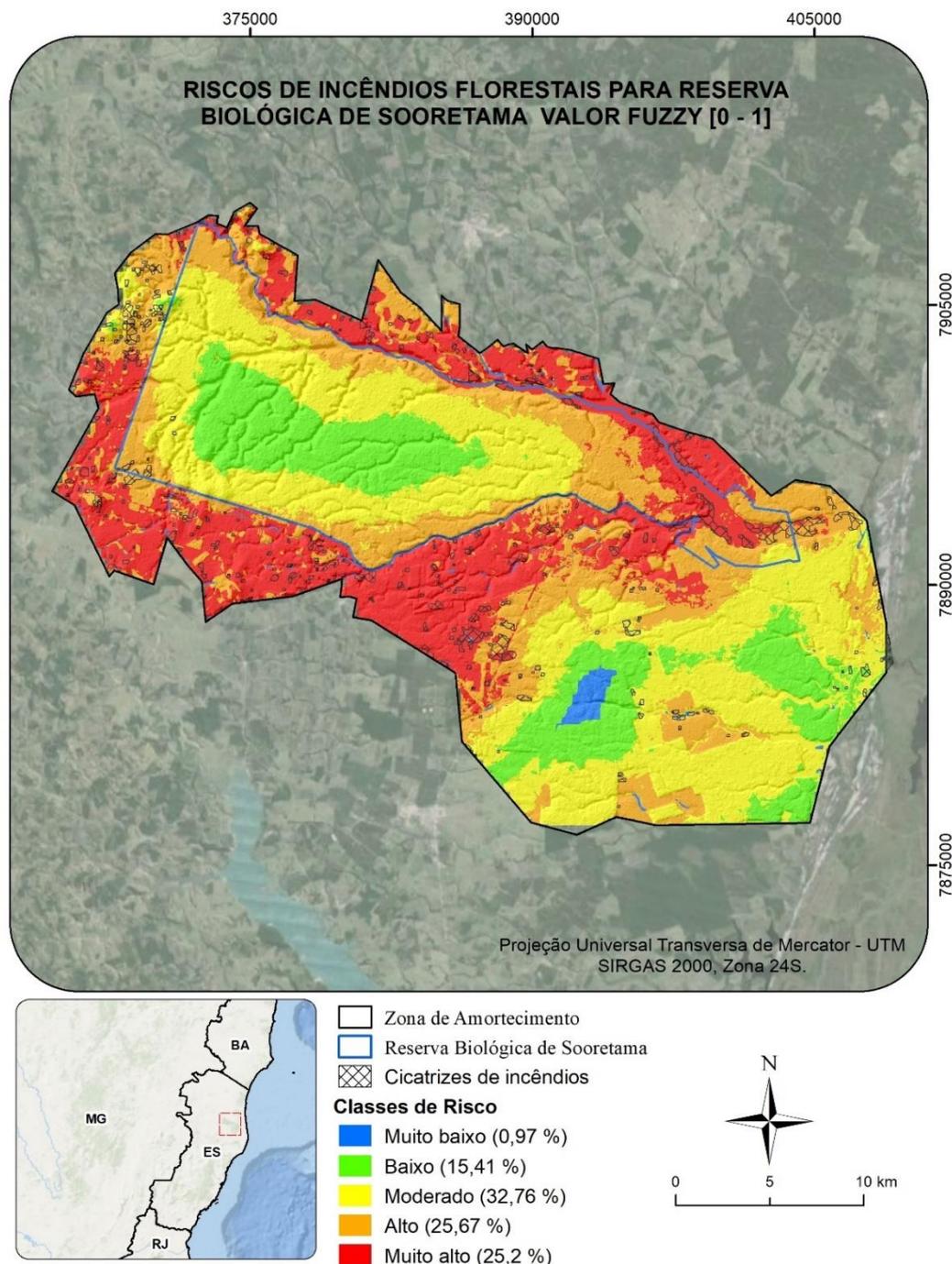


Figura 10 – Zoneamento de Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais (ZROIF) da Reserva Biológica de Sooretama e sua zona de amortecimento.

Fonte: O autor.

Os resultados demonstrados na Figura 10 evidenciaram que 83,62% da área de estudo é formada pelas classes de risco moderado, alto e muito alto, indicando que a ReBio e principalmente sua ZA apresentam risco de ocorrência de incêndios florestais bastante significativo. De acordo com os dados de UOT, a zona de amortecimento possui uso intensivo e extensivo da terra para atividades agrícolas.

Esses locais possuem grande interferência antrópica, uma vez que são voltadas para o desenvolvimento de atividades de produção e transporte de insumos (Medeiros et al., 2020).

Tanto dentro da ReBio como na porção sul da ZA a classe de risco moderado foi a mais representativa, ocupando cerca de 32,76% da área de estudo (Figura 10), sendo predominantemente formada por florestas. As florestas produzem e acumulam materiais combustíveis em sua base e topo o que pode favorecer a ignição e propagação dos incêndios (Holonec, 2012). A precipitação acumulada é outra variável importante para esta classe, pois 94% da área apresentou valores médios anuais de 1.100 a 1.200 mm, afetando moderadamente o risco conforme a Tabela 2. A precipitação na ReBio é dividida em dois períodos. Um chuvoso entre os meses de outubro a abril e um seco de maio a setembro que potencializa a ocorrência de incêndios pela secagem progressiva do material da vegetação (Paula; Soares, 2011; White, 2011).

A classe de risco alto representou 25,67% da área de estudo, sendo influenciada pelos usos do solo de pastagem e silvicultura. Essas classes estão principalmente localizadas na ZA da ReBio de Sooretama. A pastagem foi a terceira classe que mais queimou durante os anos de 1985 a 2020, já a silvicultura ficou quarto como demonstrado na Tabela 1. A pastagem acumula grande quantidade de biomassa fina, estando constantemente exposta à radiação solar, o que afeta negativamente sua umidade (Biazatti et al., 2021). As atividades silviculturais possuem a característica de acumular grandes quantidades de material combustível como galhos, folhas e cascas, além da presença de maquinários de colheita e logística florestal, que podem produzir faíscas e facilitar o início e propagação do fogo (White, 2013).

A faixa de temperatura de 22 °C a 24 °C correspondeu a 73% da área de estudo, contribuindo para o risco alto. O aumento da temperatura do ambiente faz com que a umidade relativa do ar decresça. Essa relação pode favorecer às ocorrências de incêndios (Torres, 2006).

As variáveis que afetaram a classe de risco muito alto, foram a altitude, proximidade a malha viária, atividades agrícolas, áreas de formação herbácea inundável, herbácea inundada e zonas de calor. A altitude e a proximidade da malha viária atingiram valores próximos de (1) na escala de risco do conjunto *Fuzzy* em

maior parte da área de estudo. A área de estudo possui altitude abaixo dos 600 metros em sua totalidade. Esse resultado corrobora com os trabalhos de Ribeiro et al. (2008) e Oliveira (2002), afirmando que altitudes abaixo dos 600 metros em relação ao nível do mar representam um risco muito alto de incêndios florestais pelo fato de que, em altitudes baixas, observa-se temperaturas mais altas e, conseqüentemente, um valor reduzido de umidade relativa do ar. Tagliarini et al. (2020) e Eugenio et al. (2016) relataram que altitudes mais baixas proporcionam maior quantidade de oxigênio para a combustão.

O risco apresentado pela malha viária se concentrou na ZA, pois é onde se concentra o maior número de estradas terciárias. Porém, dois pontos internos da ReBio de Sooretama possuem estradas o que elevou o risco de incêndios nessas regiões (Figura 8b). Nas proximidades das estradas o fluxo de pessoas é maior e há a presença de andarilhos, que fazem fogueiras e as abandonam, podendo causar incêndios (Mma, 2007). Além disso, as estradas são facilitadores para acesso de indivíduos que intencionalmente ou não iniciam o processo de dispersão de fogo (Cipriani et al., 2011). Segundo Ribeiro et al. (2008) mesmo as estradas estreitas com fluxo reduzido apresentam risco e não devem ser desconsideradas.

Analisando o histórico de áreas queimadas, a agricultura foi a classe de OUT que mais queimou (39,27%), afetando de forma muito alta o risco. Essa atividade apresenta mudanças constantes no uso do solo para subsídio de pastagens e gado, assim como outras culturas anuais. Além dos hábitos da população em praticar queimadas para manejo de áreas para cultivo nas propriedades rurais, aumentando drasticamente o risco de grandes incêndios florestas, principalmente quando conduzido de forma imprudente e ilegal (Ramalho, 2022).

As classes de formação herbácea inundável e herbácea inundada ocuparam a segunda posição no rank de áreas que mais queimaram no período avaliado, cerca de 19,35% conforme demonstrado na Tabela 1. Apesar dessas fitofisionomias estarem associadas a presença de regiões alagadas, a junção das mudanças do uso do solo, expansão urbana, alterações nos regimes hidrológicos e alterações climáticas influenciam na disponibilidade de combustíveis e regimes de fogo dessas áreas (Kurki-fox et al., 2019). Segundo o Icmbio (2016), a vegetação das regiões de herbácea inundável e herbácea inundada (Ciperácea, Poácea, Arácea e turfás) em conjunto a longas estiagens e altas temperaturas foram os precursores dos grandes

incêndios florestais que atingiram a Rebio de Sooretama nos anos de 2015 e 2016, consumindo aproximadamente 2000 hectares de vegetação nativa, corroborando com as cicatrizes mapeadas pelo MapBiomas nesse período (Pereira, 2022).

Os locais com maior densidade de zonas de calor apresentaram valores próximos de 1 no conjunto *Fuzzy* (Figura 9e). Nota-se que as áreas de maior risco foram localizadas na região sudeste da ReBio, onde predomina uma vegetação rasteira e fina, que trazem maiores alertas principalmente em períodos secos e de estiagem. Os autores Anderson et al. (2017) mostraram que os locais de alerta máximo de incêndios florestais estão relacionados ao maior número de zonas de calor.

#### 5.1.4 Validação do modelo

A análise demonstrou que o modelo desenvolvido nesse trabalho para Reserva Biológica (REBIO) de Sooretama e sua zona de amortecimento (ZA) possui um nível alto de assertividade, com 98,05% das cicatrizes de incêndios dos anos analisados sobre as classes de risco moderado, alto e muito alto como demonstrado na Tabela 4 e ilustrado na Figura 10.

Tabela 4 - Histórico de áreas queimadas e sua proporção por classe de risco

CLASSE	ÁREA QUEIMADA (ha)	PORCENTAGEM
Muito Baixo	15,57	0,61 %
Baixo	33,76	1,33 %
Moderado	167,20	6,6 %
Alto	750,69	29,63 %
Muito Alto	1.566,51	61,83 %
<b>Total</b>	<b>2.534,09</b>	<b>100%</b>

Fonte: O autor.

#### 5.2 Distribuição Espacial de Material Combustível

Assim como os diversos fatores elucidados nesse trabalho que explicam os incêndios florestais, a disponibilidade e distribuição de material combustível está entre os principais responsáveis pelos grandes incêndios em escala global (Eloy et al., 2021). A Figura 11 indica a distribuição de vegetação seca, vegetação verde e solo exposto. As regiões em verde representam as densas matas de tabuleiros e áreas de gramíneas úmidas ocupando 75,63% do território. As cores em azul escuro indicam as frações de solo exposto e massas d'água (4,33%). As cores em vermelho indicam a vegetação seca/ morta que representam cerca de 20,15% da área de estudo que devem ser tratadas com maior atenção.

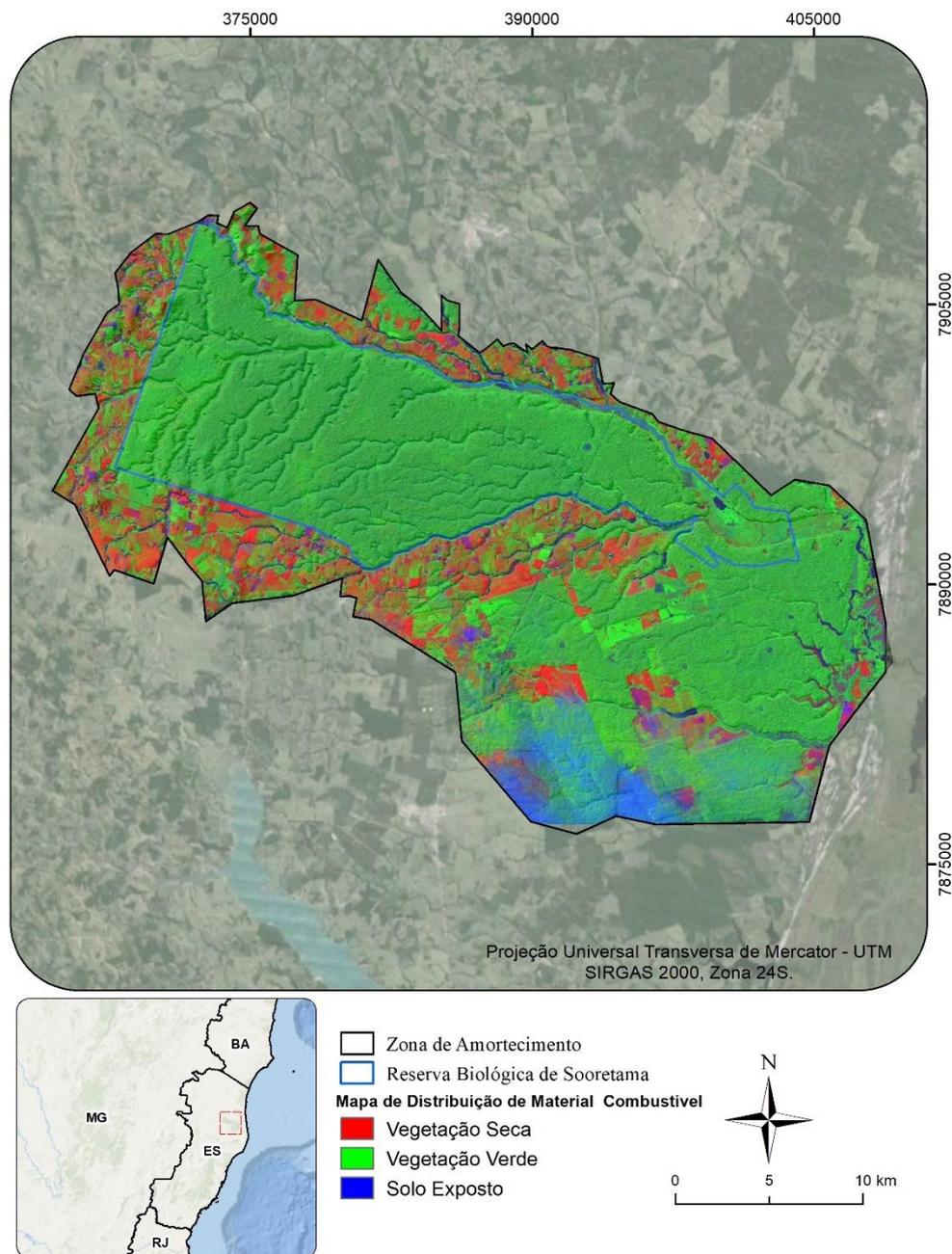


Figura 11– Distribuição da vegetação seca, vegetação verde e solo exposto derivadas de imagens Sentinel – 2.

Fonte: O autor

Segundo o Instituto de Pesquisas da Mata Atlântica (IPEMA) a vegetação da região norte do estado do Espírito Santo ocorre sob um clima ombrófilo, com chuvas bem distribuídas na maior parte do ano, podendo apresentar até dois meses de umidade escassa. Essa característica pode explicar o caráter verde das áreas florestais da área mesmo no período seco amostrado (Icmbio, 2014).

As áreas em lilás no mapa de combustível, representam uma mistura de vegetação seca (vermelha) e fração de solo exposto (azul), podendo descrever

áreas em recuperação (brotação) de incêndios ou outras intervenções humanas, assim como cultivos em período inicial (Franke et al., 2018).

As áreas indicadas em vermelho estão majoritariamente presentes na ZA da reserva como demonstrado na Figura 11, onde se concentram as maiores interferências humanas no uso e ocupação do solo. As atividades agropecuárias com intenso uso de pastagem são as principais fontes de carga combustível que ameaçam a ReBio. Na Figura 12 podemos observar a sobreposição das classes do uso do solo em vegetação seca.

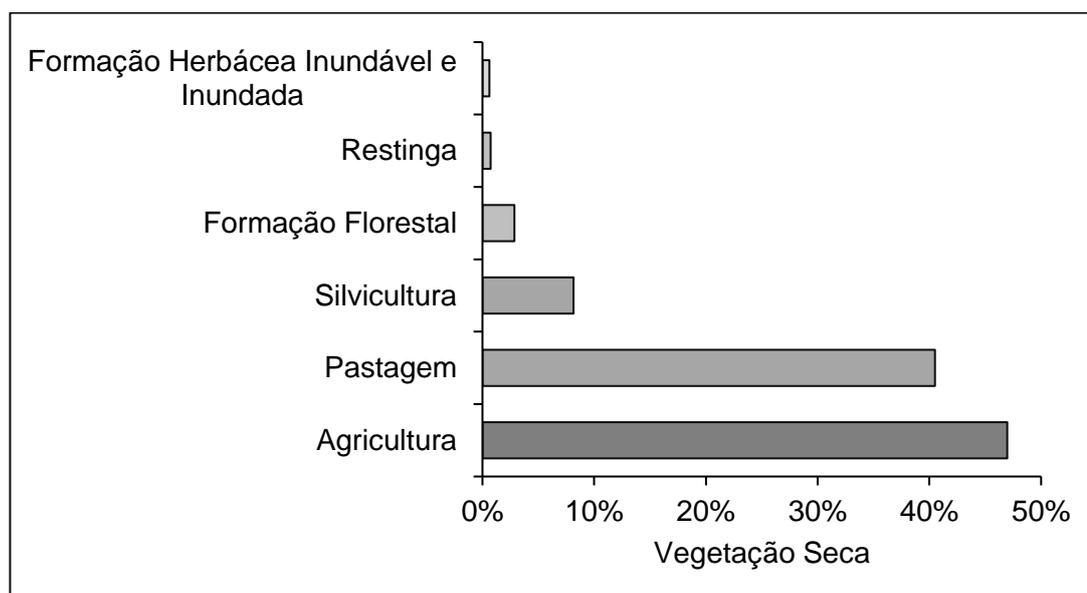


Figura 12 – Proporção das classes do uso e ocupação do solo aderida aos locais de vegetação seca.

Fonte: O autor.

De acordo com a Figura 12, os usos de dominância foram a agricultura, com cerca de 46,97% e pastagem com 40,5% em vegetação seca. As paisagens são áreas propensas aos incêndios, pois além da facilidade de queima e propagação do fogo, as práticas de queimadas usadas na agricultura para manejo e renovação dessa vegetação são agravantes quando saem de controle, aumentando o risco de incêndios (Coelho 2020; Tebaldi; Fiedler; Juvanhol, 2013).

### 5.3 Validação das assinaturas espectrais dos *endmembers*

A assinatura espectral da vegetação seca quando comparada com a da vegetação verde, demonstra refletância levemente aumentada nas bandas do visível (0.49 - 0.66  $\mu m$ ), refletância reduzida no NIR (0.84  $\mu m$ ) e refletância na região do SWIR (1.61 - 2.19  $\mu m$ ) aumentada. A vegetação fotossinteticamente ativa reflete fortemente nas faixas do infravermelho (NIR) devido as características das

moléculas presentes nas células vegetais, em especial a clorofila, que por natureza estão com maior concentração de água (Franke et al., 2018; Yebra et al., 2013). Em contrapartida as plantas em processo de desidratação e senescência, os espaços celulares que são interfaces reflexivas são reduzidos, o que reduz a refletância na faixa do NIR. A vegetação seca reflete mais nas faixas do SWIR quando comparado com o NIR, isso ocorre devido a menor absorção de luz pela água (Knipling, 1970).

A refletância de solo exposto pode variar dependendo da região e tipo de composição, sendo que apresenta sempre altos níveis de radiação eletromagnética refletida em todas as bandas analisadas. (Franke et al., 2018; Qi et al., 2014; Ceccato; Flasse; Gregoire, 2002; Knipling, 1970). A figura 13 demonstra o comportamento das assinaturas espectrais das amostras de cada componente avaliado.

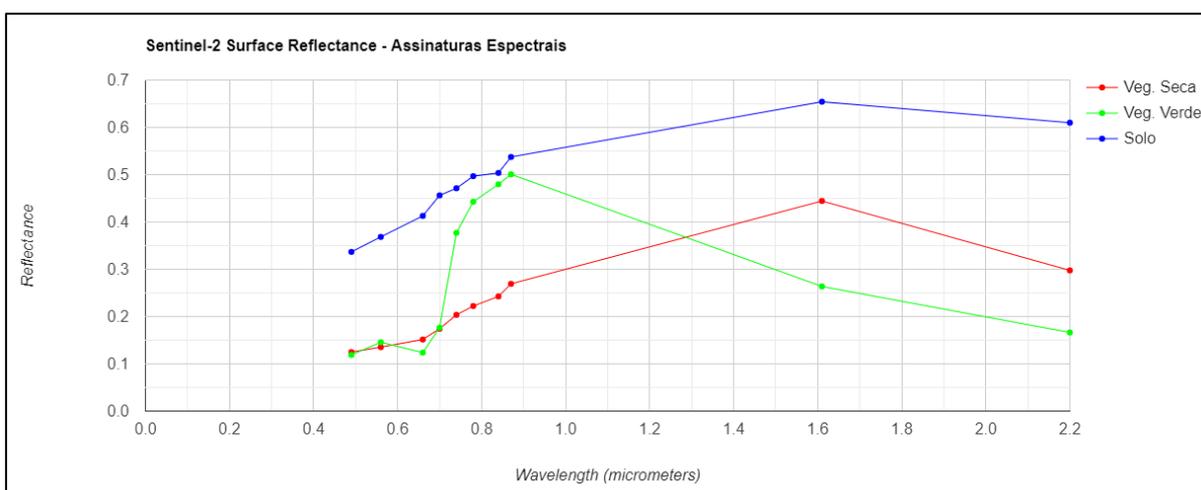


Figura 13 – Gráfico de assinaturas espectrais dos endmembers vegetação seca, solo exposto e vegetação verde

Fonte: O autor.

### 5.3 Áreas prioritárias para construção de aceiros

A área de estudo apresentou 13,7% de território com condições propicias a construções de aceiros, sendo 3,11% em áreas de prioridade alta e 13,95% em muito alta como apresentado no mapa A da Figura 13.

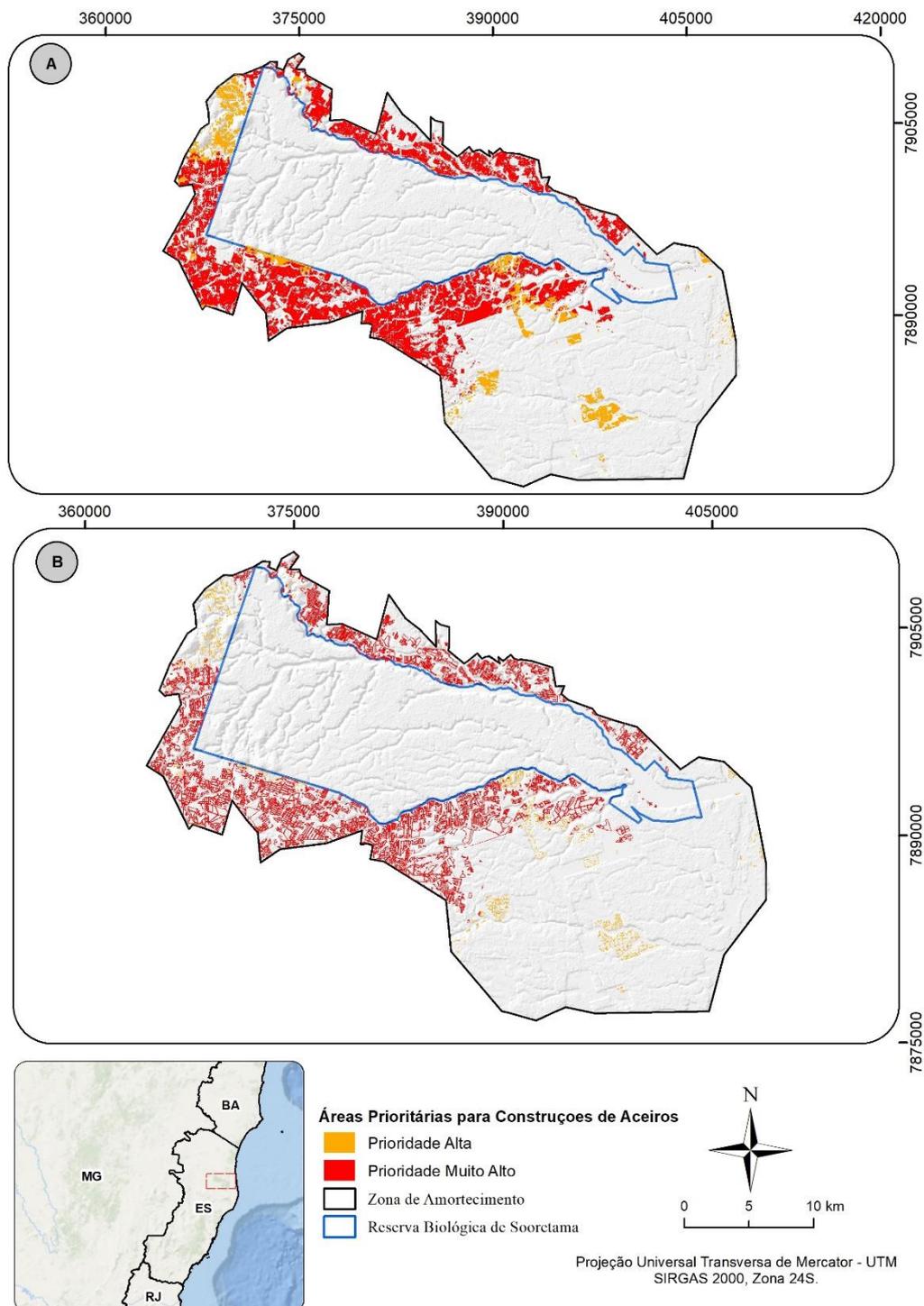


Figura 14 – (A) Áreas prioritárias para construção de aceiros; (B) Faixas de aceiros de 15m e 30m.

Fonte: O autor.

Entretanto, por se tratar de uma área muito extensa, se torna inviável o uso de sua totalidade para a construção de aceiros. Portanto, foram reduzidas por faixas de 15 metros nas áreas de prioridade alta e 30 metros em prioridade muito alta,

representando 0,8% e 7,7% da área de estudo respectivamente como apresentado no mapa B da Figura 13 (Rocha et al., 2013; Soares, 2000). As larguras dos aceiros foram definidas a partir das características de cada ambiente, sendo utilizados aceiros mais largos em áreas de maior risco e com maior disponibilidade de combustível, onde há maior potencial para incêndios de grandes proporções. Enquanto aceiros mais estreitos foram usados com o intuito de reduzir a propagação do fogo em pastagens e florestas que normalmente sofrem apenas incêndios superficiais (Zong; Tian; Wang, 2021; Morvan, 2015).

A grande maioria das áreas prioritárias está localizada na zona de amortecimento da UC, o que pode ser explicado pelo alto risco de incêndios identificado no ZROIF e pelo significativo acúmulo de material combustível seco presente nessa região. Ambos fortemente influenciados pela presença de atividades e infraestruturas humanas. Os aceiros devem ser construídos paralelamente as estradas florestais aos limites de propriedades florestais e agrícolas e dentro de florestas quando necessário e sempre que possível estarem ligados a barreiras naturais (Demir et al., 2009).

Apesar de o Plano Operativo de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais da ReBio relatar que são realizadas limpezas e manutenção dos acessos pela equipe de brigada em pontos estratégicos da reserva durante o ano, percebe-se a carência de informações disponíveis sobre a malha de aceiros e informações sobre o atual cenário de atividades preventivas, evidenciando a necessidade da ampliação da alocação de aceiros. A maior densidade de aceiros de menor largura pode ser mais eficiente quando comparados aos de baixa densidade e largura ampla (Zong; Tian; Wang, 2021; Demir et al., 2009; Duguay et al., 2007).

Desta forma, a priorização dos locais apresentados na Figura 13 para descontinuidade do material combustível, por meio da construção de aceiros é fundamental para diminuir a velocidade de propagação de possíveis incêndios que podem afetar os recursos ambientais da ReBio de Sooretama. A implementação de aceiros em unidades de conservação como o Parque Nacional das Emas, Chapada dos Veadeiros, Sete Cidades e Serra da Canastra tem desempenhado um papel significativo na redução da frequência e da extensão das áreas afetadas por incêndios, sendo essenciais para interromper os ciclos de grandes incêndios que ocorriam a cada três/quatro anos (Medeiros; Fiedler, 2004).

A partir das informações fornecidas pelo mapa de áreas prioritárias para a construção de aceiros, os gestores da ReBio podem estabelecer estratégias de gestão da terra e do fogo em conjunto com as comunidades locais, contribuindo significativamente para o processo de tomada de decisão.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram que a metodologia *Fuzzy* foi eficiente para estimar o risco de incêndios florestais para REBIO de Sooretama e sua zona de amortecimento.

A área de estudo predominantemente possui risco moderado a alto, porém, apresenta regiões expressivas de risco muito alto, evidenciando a necessidade da adoção de medidas preventivas de controle por parte da gestão da UC e maior conscientização da população local.

As áreas com maior presença de material combustível afetadas pelo período seco de 2023 estão situadas na zona de amortecimento. Os mapas das condições dos combustíveis provaram ser valiosos e com grande potencial de apoiar os líderes no gerenciamento das ações contra os incêndios. Esse dado pode ser utilizado de forma rápida e prática através da plataforma GEE em períodos de maior seca ou conforme as necessidades da reserva.

A maior presença de combustível seco ocorreu sobre as classes de agricultura e pastagem, evidenciando a necessidade de maiores atividades, principalmente voltadas para o manejo do material combustível.

Atestou-se que a metodologia pode fornecer suporte para a criação de medidas prioritárias de prevenção e planos de combate a incêndios florestais. Como sugestão como evitar futuros incêndios, os gestores devem priorizar a construção aceiros a partir das áreas prioritárias próximas as áreas de mata nativa da ReBio de Sooretama. Direcionar recursos em vigilâncias principalmente nos meses mais secos de maio a setembro e realizar campanhas educativas junto à comunidade local, abordando práticas seguras do uso do fogo.

Por fim, conclui-se que os resultados obtidos possibilitaram a visualização da distribuição espacial e identificação das áreas mais vulneráveis, contribuindo para a tomada de decisão na realização de atividades preventivas, de manejo e combate mais eficientes para a REBIO de Sooretama e sua Zona de Amortecimento.

## 5 REFERÊNCIAS

- ALKHATIB, Ramez et al. A brief review of machine learning algorithms in forest fires science. **Applied Sciences**, v. 13, n. 14, p. 8275, 2023.
- ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANDERSON, Liana Oighenstein et al. Utilização de dados orbitais de focos de calor para caracterização de riscos de incêndios florestais e priorização de áreas para a tomada de decisão. **Revista brasileira de cartografia**, v. 69, n. 1, p. 163-177, 2017.
- ARAGÃO, Mariana et al. Risk of forest fires occurrence on a transition island Amazon-Cerrado: Where to act?. **Forest Ecology and Management**, v. 536, p. 120858, 2023.
- ARROYO, Lara A.; PASCUAL, Cristina; MANZANERA, Jose A. Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing. **Forest ecology and management**, v. 256, n. 6, p. 1239-1252, 2008.
- ASNER, Gregory P. et al. Ecosystem structure throughout the Brazilian Amazon from Landsat observations and automated spectral unmixing. **Earth Interactions**, v. 9, n. 7, p. 1-31, 2005.
- BENSUSAN, Nurit. **Conservação da biodiversidade em áreas protegidas**. FGV Editora, 2006.
- BERGAMASCHI<sup>1</sup>, Rodrigo Bettim; COELHO, André Luiz Nascentes; DE GEOPROCESSAMENTO-CGEO, Coordenação. SIG aplicado à segurança no trânsito – Estudo de caso no município de Vitória-ES. 2010.
- BIAZATTI, Leonardo Duarte et al. Mapping the risk of forest fires in the Rio Preto National Forest in the Atlantic Forest. **Floresta**, v. 51, n. 4, p. 1062-1072, 2021.
- BOND, William J.; KEELEY, Jon E. Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems. **Trends in ecology & evolution**, v. 20, n. 7, p. 387-394, 2005.
- BORGES, Kelly Maria Resende et al. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Como Subsídio Ao Manejo Do Fogo e Ao Combate Aos Incêndios Florestais Em Unidades de Conservação Federais. **Biodiversidade Brasileira**, v. 11, n. 2, p. 168-178, 2021.
- BORRELLI, Pasquale, et al. The implications of fire management in the Andean páramo: a preliminary assessment using satellite remote sensing. *Remote Sensing*, 2015, 7.9: 11061-11082.
- BRASIL. Lei Federal Nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o Artigo 255, Parágrafo 1º, Incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 19 jul. 2000. Acesso: em 07 out. 2023.

BRASIL. **PORTARIA DEC/C Ex nº 66, de 13 de março 2023.** Dispõe sobre as Instruções sobre Orientações Práticas relacionadas aos Serviços Florestais em Organizações Militares. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, 2023.

BRASIL. **PROJETO DE LEI, de 2018.** Dispõe sobre a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, 2018.

CARDOSO, Josiane Teresinha. A Mata Atlântica e sua conservação. **Revista Encontros Teológicos**, v. 31, n. 3, 2016.

CECCATO, Pietro; FLASSE, Stephane; GREGOIRE, Jean-Marie. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2. Validation and applications. **Remote sensing of Environment**, v. 82, n. 2-3, p. 198-207, 2002.

CIPRIANI, Henrique Nery et al. Fire risk map for the Serra de São Domingos Municipal park, Poços de caldas, MG. **Cerne**, v. 17, p. 77-83, 2011.

COELHO, André Luiz Nascentes; GIMENES, Ana Christina Wigneron; GOULART, A. C. O. Geotecnologias Aplicadas a Análise Espaço-Temporal das Queimadas e Incêndios em Escala Estadual: Conhecer para prevenir. **L. Magnoni Junior, CM de Freitas, E. SS Lopes, GRB Castro, HA Barbosa, LR Londe, M. Da GM Magnoni, RS Silva, TT e W. dos S. Figue (Org.), Redução do risco de desastres e a resiliência no meio rural e urbano**, v. 2, p. 372-389, 2020.

CROWTHER, Thomas W. et al. Mapping tree density at a global scale. **Nature**, v. 525, n. 7568, p. 201-205, 2015.

DA SILVA, Elaine Cristina Gomes et al. Measuring public expenses with workforce in fighting forest fire. **Floresta**, v. 50, n. 4, p. 1912-1920, 2020.

DE JESUS, Janisson B.; SANTANA, Ighor DM. Estimation of land surface temperature in Caatinga area using Landsat 8 data. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 7, n. 3, p. 150-157, 2017.

DEMIR, Murat et al. Assessment of forest roads and firebreaks in Turkey. **African Journal of Biotechnology**, v. 8, n. 18, 2009.

DUGUY, Beatriz et al. Modelling the effects of landscape fuel treatments on fire growth and behaviour in a Mediterranean landscape (eastern Spain). **International Journal of Wildland Fire**, v. 16, n. 5, p. 619-632, 2007.

ELOY, Ludivine et al. 7.5. Manejo do fogo por povos indígenas e comunidades tradicionais no Brasil. **Povos tradicionais e biodiversidade no Brasil: contribuições dos povos indígenas, quilombolas e comunidades tradicionais para a biodiversidade, políticas e ameaças/Seção 7 (org. Laure Empeaire): Gerar, cuidar e manter a diversidade biológica**, v. 7, p. 72-93, 2021.

ESRI. **How Fuzzy Overlay works**, 2021. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fuzzy-overlay-works.htm>. Acesso em: 17 fev. 2024.

EUGENIO, F. C. et al. Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 173, p. 65–71, 2016.

FALKOWSKI, Michael J. et al. Characterizing and mapping forest fire fuels using ASTER imagery and gradient modeling. **Forest ecology and management**, v. 217, n. 2-3, p. 129-146, 2005.

FIEDLER, N. C. et al. Firefighting combat with fire retardants at different concentrations. **Floresta**, v.50, n. 1, p. 1107–1112, 2020.

FIEDLER, N. C. et al. Métodos de detecção e técnicas de combate aos incêndios florestais. In: NILTON CESAR, F.; SANT'ANNA, C. DE M.; RAMALHO, A. H. C. (Eds.). **Incêndios Florestais**. 1. ed. Jerônimo Monteiro - ES: UFES. v. 1p. 153–194, 2020b.

FIEDLER, N. C. et al. Técnicas de prevenção de incêndios florestais. In: NILTON CESAR, F.; SANT'ANNA, C. DE M.; RAMALHO, A. H. C. (Eds.). **Incêndios Florestais**. 1. ed. Jerônimo Monteiro - ES: UFES. v. 1p. 85–98, 2020b.

FIEDLER, N. C.; SANT'ANNA, C. de M.; RAMALHO, A. H. C. **Incêndios Florestais**. Jerônimo Monteiro: Universidade Federal do Espírito Santo, 2020a.

FIEDLER, Nilton César; MERLO, Daniela Araújo; MEDEIROS, Marcelo Brilhante de. Ocorrência de incêndios florestais no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, Goiás. **Ciência Florestal**, v. 16, p. 153-161, 2006.

FRANKE, Jonas et al. Fuel load mapping in the Brazilian Cerrado in support of integrated fire management. **Remote Sensing of Environment**, v. 217, p. 221-232, 2018.

GÜNGÖROĞLU, Cumhur. Determination of forest fire risk with fuzzy analytic hierarchy process and its mapping with the application of GIS: The case of Turkey/Çakırlar. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v. 23, n. 2, p. 388-406, 2017.

HAWBAKER, Todd J. et al. Mapping burned areas using dense time-series of Landsat data. **Remote Sensing of Environment**, v. 198, p. 504-522, 2017.

HE, Yuhong; YANG, Jian; GUO, Xulin. Green vegetation cover dynamics in a heterogeneous grassland: Spectral unmixing of landsat time series from 1999 to 2014. **Remote Sensing**, v. 12, n. 22, p. 3826, 2020.

HEIMES, Frederick John. **Effects of scene proportions on spectral reflectance in lodgepole pine**. 1977. Tese de Doutorado. Colorado State University.

HERRMANN, Pâmela Boelter. Análise do comportamento espaço-temporal do fogo em formações campestres do Bioma Mata Atlântica no estado do Rio Grande do Sul. 2023.

HORWITZ, Harold M. et al. Estimating the proportions of objects within a single resolution element of a multispectral scanner. In: **International Symposium on Remote Sensing of Environment, 7th, University of Michigan**. 1971.

ICMBIO INSTITUTO CHICO MENDES PARA A CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Plano de manejo da reserva biológica de Sooretama. Brasília. 2019**. Disponível em: [https://www.gov.br/icmbio/ptbr/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/mata-atlantica/lista-de-ucs/rebio-desooretama/arquivos/plano\\_de\\_manejo\\_rebio\\_de\\_sooretama.pdf](https://www.gov.br/icmbio/ptbr/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/mata-atlantica/lista-de-ucs/rebio-desooretama/arquivos/plano_de_manejo_rebio_de_sooretama.pdf). Acesso em: 08 out. 2023.

ICMBIO. **RESERVA BIOLÓGICA DE SOORETAMA**. 2014. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/rebiosooretama/aspectos-fisicos-e-biologicos.html>. Acesso em: 23 mar. 2024.

ICMBIO. **RESERVA BIOLÓGICA DE SOORETAMA**. 2016. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/rebiosooretama/destaques.html>. Acesso em: 23 mar. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISAS DA MATA ATLÂNTICA (IPEMA). **Conservação da Mata Atlântica no Estado do Espírito Santo: cobertura florestal e unidades de conservação**. Vitória, ES: IPEMA, 2005.

JUVANHOL, Ronie S. et al. Gis and fuzzy logic applied to modelling forest fire risk. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, 2021.

KNIPLING, Edward B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote sensing of environment**, v. 1, n. 3, p. 155-159, 1970.

KRUSE, Fred A. et al. The spectral image processing system (SIPS)—interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote sensing of environment**, v. 44, n. 2-3, p. 145-163, 1993.

LEAL, FABRÍCIO ASSIS; DE SOUZA, FRANCISCA FABRICIA BEZERRA; LEAL, GLÓRIA DA SILVA ALMEIDA. Zoneamento de riscos de incêndios florestais em regiões hot spot de focos de calor no estado do Acre. **Nativa**, v. 7, n. 3, p. 274-283, 2019.

LEAVESLEY, Adam; VAN DIJK, Albert; YEBRA, Marta. A LIDAR-derived fuel map for the ACT. In: **Proceedings of the Bushfire and Natural Hazards CRC and AFAC Conference**. 2018.

LOPES, Ada Amélia Sanders et al. Lógica fuzzy como ferramenta para avaliação da degradação ambiental em rios: relação entre os parâmetros DBO/OD. 2016.

LOPES, Márcia R. Plano de Manejo para a Reserva Biológica de Sooretama, Estado do ES. Encarte 1 – Contextualização da Unidade de Conservação. Versão Final. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio): Brasília. 17p, 2012.

MEDEIROS, Amanda Silva de et al. Anthropogenic interference in mangrove areas of the Mundaú-Manguaba estuarine lagoon complex (CELMM), Alagoas (Brazil) as a case study. **Ciência Rural**, v. 50, p. e20200356, 2020.

MEDEIROS, Marcelo Brilhante de; FIEDLER, Nilton Cezar. Incêndios florestais no Parque Nacional da Serra da Canastra: desafios para a conservação da biodiversidade. **Ciência Florestal**, v. 14, p. 157-168, 2004.

MENGUE, Vagner Paz. Análise espacial dos registros de focos de calor na área de proteção ambiental do Parque Nacional da Chapada dos Guimarães/MT entre os anos de 2002 a 2021. **Revista Georaguáia**, v. 12, n. 2, p. 84-105, 2022.

MERRILL, D. F.; ALEXANDER, Martin E. Glossary of forest fire management terms. **Canadian Committee on Forest Fire Management, National Research Council of Canada: Ottawa, ON, Canada**, 1987.

MMA Ministério do Meio Ambiente. **Plano Operativo de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais da Reserva Biológica de Sooretama**. Sooretama. 2007.

Disponível em:

[https://www.ibama.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=892](https://www.ibama.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=892).

Acesso em: 02 fev. 2024.

MORVAN, Dominique. Numerical study of the behavior of a surface fire propagating through a firebreak built in a Mediterranean shrub layer. **Fire Jafet Jornal**, v. 71, p. 34-48, 2015.

MOTA, Pedro Henrique Santos et al. Forest fire hazard zoning in Mato Grosso state, Brazil. **Land use policy**, v. 88, p. 104206, 2019.

MULONGOY, Kalem ani Jo; CHAPE, S. Protected areas and biodiversity. **An Overview of Key Issues. CBD Secretariat and UNEP-WCMC, Montreal, Canada and Cambridge, UK**, 2004.

MUTLU, Muga et al. Mapping surface fuel models using lidar and multispectral data fusion for fire behavior. **Remote Sensing off Environment**, v. 112, n. 1, p. 274-285, 2008.

OLIVEIRA, D. Zoneamento de risco de incêndios florestais no norte de Santa Catarina. 2002.

OROZCO FILHO, Juan Carlos et al. Mapeamento de material combustível como ferramenta do manejo integrado do fogo no Parque Nacional da Serra da Canastra. **Biodiversidade Brasileira**, v. 9, n. 1, p. 201-201, 2019.

PEREIRA, O. P. **Restinga no Espírito Santo: Vegetação, Flora e Distribuição Geográfica das espécies**. 2022. 654 f. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2022.

PEREIRA, J. M. C. et al. Incêndios florestais em Portugal. **ISAPress. Lisboa**, 2006.

PEZZOPANE, José Eduardo M.; NETO, Silvio Nolasco de O.; VILELA, Marina de Fatima. Risco de incêndios em função da característica do clima, relevo e cobertura do solo. *Floresta e Ambiente*, v. 8, n. único, p. 161-166, 2012.

PRATES, Ana Paula Leite; DE AZEVEDO IRVING, Marta. Conservação da biodiversidade e políticas públicas para as áreas protegidas no Brasil: desafios e tendências da origem da CDB às metas de Aichi. **Revista brasileira de políticas públicas**, v. 5, n. 1, p. 27-57, 2015.

PRUDENTE, T. D. **Geotecnologias aplicadas ao mapeamento de risco de incêndio florestal no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros e área de entorno**. 2010. (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia. 116 f. 2010.

QI, Yi et al. Spectroscopic analysis of seasonal changes in live fuel moisture content and leaf dry mass. **Remote Sensing of Environment**, v. 150, p. 198-206, 2014.

QUINTANO, Carmen; FERNANDEZ-MANSO, Alfonso; ROBERTS, Dar A. Burn severity mapping from Landsat MESMA fraction images and Land Surface Temperature. **Remote Sensing of Environment**, v. 190, p. 83-95, 2017.

RAMALHO, A. H. C. **Modelagem Geotecnológica de Predição, Prevenção, Deteção e Combate a Incêndios Florestais**. 2022. 118 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2022.

RAMALHO, Antonio Henrique Cordeiro et al. Allocation of water reservoirs to fight forest fires according to the risk of occurrence. **Journal of environmental management**, v. 296, p. 113122, 2021.

RIBEIRO, Guido Assunção. Estratégias de prevenção contra os incêndios florestais. **Floresta**, v. 34, n. 2, 2004.

RIBEIRO, Luciene et al. Zoneamento de riscos de incêndios florestais para a Fazenda Experimental do Canguiri, Pinhais (PR). **Floresta**, v. 38, n. 3, 2008.

RIBEIRO, Milton Cezar 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, 2009.

ROBERTS, Dar A. et al. Evaluation of the potential of Hyperion for fire danger assessment by comparison to the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p. 1297-1310, 2003.

ROCHA, Francis Barbosa et al. Evaluation of Methods for Firebreak Construction to Prevent Forest Fire in Cerrado. **Journal of Biotechnology**, v. 4, n. 4, p. 333-343, 2013.

ROTUNNO, MARCEL. **Plugins QGIS**. Disponível em:

<https://plugins.qgis.org/plugins/ThresholdVect/>. Acesso em: 28 Nov. 2023.

SANT'ANNA, Cleverson M.; FIEDLER, Nilton C.; MINETTE, Luciano J. Controle de incêndios florestais. **Alegre, ES: Os Autores**, 2007.

SANTOS, Juliana Ferreira; SOARES, Ronaldo Viana; BATISTA, Antonio Carlos. Perfil dos incêndios florestais no Brasil em áreas protegidas no período de 1998 a 2002. *Floresta*, v. 36, n. 1, p. 93-100, 2006.

SHIMABUKURO, Yosio Edemir et al. Monitoring deforestation and forest degradation using multi-temporal fraction images derived from Landsat sensor data in the Brazilian Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, v. 40, n. 14, p. 5475-5496, 2019.

SHIMABUKURO, Yosio Edemir; DUTRA, Andeise Cerqueira; ARAI, Egidio. Modelo Linear de Mistura Espectral: Conceitos Teóricos, Algoritmos e Aplicações em Estudos na Amazônia Legal. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, n. Esp., p. 1140-1169, 2020.

SILVA, E.C.G. da. et al. Gastos públicos com veículos e aeronaves empregados no combate ao incêndio florestal ocorrido na Reserva Biológica de Sooretama. **Ciência Florestal**. 32(3):1290–308, 2022.

SMITH, A. M. S. et al. Production of Landsat ETM+ reference imagery of burned areas within Southern African savannahs: comparison of methods and application to MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 12, p. 2753-2775, 2007.

SOARES, Ronaldo Viana. Novas tendências no controle de incêndios florestais. **Floresta**, v. 30, n. 1/2, 2000.

SOARES, Ronaldo Viana; SANTOS, Juliana Ferreira. Perfil dos incêndios florestais no Brasil de 1994 a 1997. **Floresta**, v. 32, n. 2, 2002.

TAGLIARINI, F. DE S. N. et al. Zoneamento do risco de incêndios florestais em bacia hidrográfica. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 28779–28790, 2020.

TEBALDI, A. L. C.; FIEDLER, N. C.; JUVANHOL, R. S.; DIAS, H. M. Ações de prevenção e combate aos incêndios florestais nas unidades de conservação estaduais do Espírito Santo. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 3, p. 538-549, 2013.

TORRES, FILLIPE TAMIOZZO PEREIRA et al. **Manual de Prevenção e Combate de Incêndios Florestais**. Viçosa, MG: Os Editores, 2020. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2021/03/manual-prevencao-combate-incendios-florestais.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2024.

TORRES, Fillipe Tamiozzo Pereira et al. Perfil dos incêndios florestais em unidades de conservação brasileiras no período de 2008 a 2012. **Floresta**, v. 46, n. 4, p. 531-542, 2016.

TORRES, Fillipe Tamiozzo Pereira. Relações entre fatores climáticos e ocorrências de incêndios florestais na cidade de Juiz de Fora (MG). **Caminhos de Geografia**, v. 7, n. 18, p. 162-171, 2006.

WHITE, Benjamin Leonardo Alves; DE SOUZA RIBEIRO, Adauto. Análise da precipitação e sua influência na ocorrência de incêndios florestais no Parque Nacional Serra de Itabaiana, Sergipe, Brasil. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 6, n. 1, p. 148-156, 2011.

WHITE, L. A. S.; WHITE, B. L. A.; RIBEIRO, G. T. Modelagem espacial de risco de incêndio florestal para o município de Inhambupe, Bahia, Brasil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 85, p. 41, 2016.

YEBRA, Marta et al. A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 455-468, 2013.

YOU, Weibin et al. Geographical information system-based forest fire risk assessment integrating national forest inventory data and analysis of its spatiotemporal variability. **Ecological Indicators**, v. 77, p. 176-184, 2017.

ZONG, Xuezheng; TIAN, Xiaorui; WANG, Xianli. An optimal firebreak design for the boreal forest of China. **Science of The Total Environment**, v. 781, p. 146822, 2021.