

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Beatriz Bomfim Santos

**ANÁLISE ESPACIAL DO RISCO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS EM ÁREA DE
CERRADO: o caso da Serra da Canastra**

Uberlândia, 2026

Beatriz Bomfim Santos

**ANÁLISE ESPACIAL DO RISCO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS EM ÁREA DE
CERRADO: o caso da Serra da Canastra**

Dissertação de Mestrado apresentado à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Geografia – PPGEU – UFU, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia, sob orientação do Prof. Dr. Silvio Carlos Rodrigues.

Área de concentração: Estudos ambientais e Geotecnologias

Linha de Pesquisa: 2

Uberlândia, 2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S237 Santos, Beatriz Bomfim, 1999-
2026 ANÁLISE ESPACIAL DO RISCO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS EM
ÁREA DE CERRADO: [recurso eletrônico] : o caso da Serra da
Canastra / Beatriz Bomfim Santos. - 2026.

Orientador: Silvio Carlos Rodrigues.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Geografia.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.176>
Inclui bibliografia.

1. Geografia. I. Rodrigues, Silvio Carlos, 19 - , (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Geografia.
III. Título.

CDU: 910.1

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geografia
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1H, Sala 1H35 - Bairro Santa Monica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4381/3291-6304 - www.ppgeo.ig.ufu.br - posgeo@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	GEOGRAFIA				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico; Número 581, PPGGEO				
Data:	12 de fevereiro de 2026	Hora de início:	13h:00min	Hora de encerramento:	15h:30min
Matrícula do Discente:	12412GEO003				
Nome do Discente:	Beatriz Bomfim Santos				
Título do Trabalho:	Análise espacial do risco de incêndios florestais em área de cerrado: o caso da Serra da Canastra				
Área de concentração:	Dinâmicas Territoriais e Estudos Ambientais				
Linha de pesquisa:	Estudos Ambientais e Geotecnologias				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Análise da Evolução do Relevo da área das nascentes do Rio São Francisco na Serra da Canastra e entorno				

Reuniu-se na Sala [On-line - www.conferenciaweb.rnp.br], no Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em GEOGRAFIA, assim composta: Professores Doutores: [João Vitor Meza Bravo - IGESC-UFU](#); [Antonio José Bento Gonçalves - Universidade do Minho - Portugal](#) e [Sílvia Carlos Rodrigues - IGESC/UFU](#) orientador da candidata. A Defesa aconteceu de forma remota.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Dr. [Sílvia Carlos Rodrigues - IGESC/UFU](#), apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimeada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **Mestre**.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Silvio Carlos Rodrigues, Professor(a) do Magistério Superior**, em 12/02/2026, às 15:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Vitor Meza Bravo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 12/02/2026, às 15:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antônio José Bento Gonçalves, Usuário Externo**, em 12/02/2026, às 15:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7003369** e o código CRC **C9ACCC1A**.

DEDICATÓRIA

À minha querida mãe, que por sempre acreditar, me fez enfrentar os riscos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais por toda a dedicação, carinho e amor e, sobretudo, por acreditarem que a educação é o melhor investimento. Sem eles, esta dissertação não existiria.

Mesmo não sendo religiosa, agradeço a Deus pelo discernimento e por, de alguma forma, ter me concedido paciência e perseverança nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos, agradeço pelos conselhos acadêmicos, pelas horas de estudo compartilhadas e por tornarem esse desafio mais leve, bem como pelos momentos de descontração, igualmente importantes.

Aos colegas do Laboratório de Geomorfologia e Erosão do Solo, agradeço pela convivência, que me tornou ainda mais apaixonada pela Geografia.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO), agradeço pelas contribuições à minha formação acadêmica e por despertarem e fortalecerem minha paixão pela Geografia.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Silvio Carlos Rodrigues, agradeço pela orientação, pelos ensinamentos, pela paciência e pela confiança. Além de um grande exemplo profissional, é também uma referência de pessoa que admiro e busco me inspirar.

Aos professores Dr. António Bento-Gonçalves e Dr. João Vitor Meza Bravo, agradeço pela disponibilidade em participar da banca, pelas valiosas contribuições e por acompanharem este trabalho do início ao fim.

EPÍGRAFE

*Quem não tem jardins por dentro, não planta jardins por fora
e nem passeia por eles...*

(Rubem Alves)

RESUMO

A Serra da Canastra corresponde a uma área do Parque Nacional da Serra da Canastra (PNSC), localizado na região Sudoeste de Minas Gerais, Brasil. A área está inserida no bioma Cerrado, reconhecido como um sistema que coevoluiu com o fogo. No entanto, as transformações ocorridas a partir da segunda metade do século XX alteraram o regime natural do fogo, sobretudo em função da intensificação das interferências antrópicas. Diante desse contexto, e considerando a dependência ecológica do fogo, o PNSC passou a adotar, a partir de 2017, o Manejo Integrado do Fogo em suas áreas internas. O objetivo principal desta dissertação foi identificar as áreas mais suscetíveis à ocorrência de incêndios florestais na Serra da Canastra, a partir da integração de elementos geomorfológicos e meteorológicos, por meio da aplicação da análise multicritério pelo método *Analytic Hierarchy Process* (AHP). As áreas do parque foram classificadas em cinco níveis de risco, variando de Muito Baixo a Muito Alto. Os resultados indicaram que a distribuição espacial das classes de risco apresenta variações significativas em função dos diferentes períodos analisados, evidenciando a influência da sazonalidade climática. Observou-se, contudo, que as classes de risco mais elevadas tendem a se concentrar nas proximidades de rodovias e infraestruturas, reforçando a relevância dos fatores antrópicos na dinâmica dos incêndios. A sobreposição dos focos de calor demonstrou que, durante a estação seca, a classe de risco Moderada concentrou a maior frequência de ocorrências de incêndio. A partir da elaboração do mapa de suscetibilidade e da integração com os focos registrados, foi possível, ainda, analisar a severidade de uma cicatriz de incêndio por meio de índices espectrais, evidenciando a heterogeneidade espacial dos impactos do fogo. De modo geral, os resultados ressaltam a importância da modelagem espacial do risco como subsídio ao planejamento e à gestão do Manejo Integrado do Fogo no Parque Nacional da Serra da Canastra.

Palavras-chave: Fogo, Modelagem Ambiental, Risco, Severidade, Suscetibilidade.

ABSTRACT

The Serra da Canastra is part of the Serra da Canastra National Park (SCNP), located in southwestern Minas Gerais, Brazil. The study area lies within the Cerrado biome, which is recognized as a system that coevolved with fire. However, transformations that occurred from the second half of the 20th century onward altered the natural fire regime, mainly due to increasing anthropogenic interference. In this context, and considering the ecological dependence on fire, the SCNP has adopted Integrated Fire Management since 2017. The main objective of this dissertation was to identify areas most susceptible to wildfires in the Serra da Canastra through the integration of geomorphological and meteorological factors, using a multicriteria analysis based on the Analytic Hierarchy Process (AHP). The park area was classified into five fire risk levels, ranging from Very Low to Very High. The results indicate that the spatial distribution of risk classes varies significantly according to the different periods analyzed, highlighting the influence of climatic seasonality. Nevertheless, higher risk classes tend to be concentrated near roads and infrastructure, emphasizing the relevance of anthropogenic factors in fire dynamics. The overlay of fire hotspots showed that during the dry season the Moderate risk class concentrated the highest frequency of fire occurrences. Additionally, based on the susceptibility mapping and the integration with hotspot data, it was possible to analyze the severity of a fire scar using spectral indices, revealing marked spatial heterogeneity in fire impacts. Overall, the results underscore the importance of spatial fire risk modeling as a key tool to support planning and decision-making within Integrated Fire Management in the Serra da Canastra National Park.

Keywords: Fire, environmental modeling, risk, severity, susceptibility.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA

1 - Modelo conceitual para determinar o grau de risco.....	23
2 - Fluxograma estrutural da dissertação.....	40
3 - Fluxograma com as etapas da elaboração do risco estrutural de incêndio.....	41
4 - Matriz estruturada para o risco estrutural.....	46
5 - Fluxograma com as etapas da elaboração do risco dinâmico de incêndio.....	47
6 - Matriz elaborada com os componentes do risco dinâmico.....	48
7 - Matriz elaborada para o Risco Integrado.....	50
9 - Domínio morfoestrutural e regiões geomorfológicas do PNSC.....	57
26 - Cicatrizes de Incêndio em agosto de 2020.....	81

GRÁFICO

17 - Temperaturas mensais (2020 -2024)	71
18 - Média mensal do regime pluviométrico (2020 -2024)	72
19 - Histograma meteorológico.....	73
20 - Distribuição do NDVI por mês.....	74
22 - Área ocupada pelas classes de risco integrado de incêndios florestais.....	76
25 - Distribuição dos focos de calor por classe de Risco Integrado de incêndio florestal.....	80
30 - Distribuição da área pelos níveis de severidade em %	85

MAPA

8 - Localização da área de estudo.....	55
10 -Uso e Cobertura e Classe de Risco da Serra da Canastra.....	63
11 - Declividade e Classes de Risco.....	64
12 - Mapa da Rodovias e Infraestruturas da área de estudo.....	65
13 - Classes de risco da Distância das rodovias e infraestruturas.....	66

14 - Orientação das Vertentes e Classe de Risco.....	67
15 - Altimetria e distribuição das Classes de Risco da Serra da Canastra.....	69
16 - Risco estrutural de incêndios florestais da Serra da Canastra.....	70
21 - Mapa de Risco de Dinâmico da Serra da Canastra.....	74
23 - Risco Integrado de Incêndios Florestais da Serra da Serra da Canastra.....	77
24 - Sobreposição dos Focos de calor sobre o mapa de Risco Integrado de Incêndios Florestais da Serra da Canastra.....	79
27 - Combinação colorida para visualização de cicatrizes de queimadas.....	82
28 - Comparação entre as composições de bandas.....	83
29 - Níveis de severidade do incêndio.....	84

TABELAS

1 - Glossário dos termos e conceitos de incêndio.....	31
2 - Escala de comparação entre os respectivos pesos.....	43
3 - Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n.....	44
4 - Peso para as variáveis estruturais aplicadas na pesquisa, suas classes, risco de fogo e referências.....	45
5 - Peso para as variáveis dinâmicas aplicadas na pesquisa, suas classes, risco de fogo e referências.....	48
6 - Peso para o mapa de risco integrado aplicado na pesquisa, suas classes, risco de fogo e referências.....	49
7 - Data dos focos de incêndios e das imagens analisada.....	52
8 - Classificação de severidade do incêndio.....	52
9 - Área ocupada pelas classes de Uso e Cobertura.....	62
10 - Área ocupada pelas classes de Declividade (%).....	64
11 - Distância das rodovias e infraestruturas e Classes de riscos.....	66
12 - Distribuição da área pela Orientação das Vertentes.....	67
13 - Distribuição das Orientações das Vertentes por Classe de Risco.....	68
14 - Distribuição da altimetria pela Classe de Risco.....	69

15 - Distribuição das classes de risco na área de estudo.....	70
16 - área ocupada pelas classes de risco integrado de incêndio florestal.....	75
17 - Distribuição da área pelos níveis de severidade.....	84
18 - Relação entre a severidade e a suscetibilidade pela distribuição da área (km ²).....	86
19 - Distribuição da classe de risco pela área em %.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP - *Analytical Hierarchy Process*

CNN - *Convolutional Neural Network*

CMIF - Coordenação de Manejo Integrado do Fogo

COMIF - Comitê de Assessoramento Técnico do MIF

EESGT - Estação Ecológica Serra Geral do Tocantins

IC - Índice de Consistência

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

IDW - *Inverse Distance Weighted*

IR - Índice Randômico

IUCN - *International Union for Conservation of Nature*

JRC - *Joint Research Centre*

MDE - Modelo Digital de Elevação

MIF - Manejo Integrado do Fogo

ML - *Machine Learning*

NBR - *Normalized Burn Ratio*

NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

NDWI - *Normalized Difference Water Index*

PEJ - Parque Estadual do Jalapão

PMIF - Plano de Manejo Integrado do Fogo

PNB - Parque Nacional de Brasília

PNCM - Parque Nacional da Chapada das Mesas

PNSC - Parque Nacional da Serra da Canastra

RC - Razão de Consistência

RNA - Rede Neural Artificial

ROIs - Registros de Ocorrência de Incêndios Florestais

SNUC - Sistema Nacional de Unidades de Conservação

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

UC - Unidade de Conservação

USGS - *United States Geological Survey*

Sumário

CAPÍTULO I.....	16
1. APRESENTAÇÃO.....	17
1.1 INTRODUÇÃO	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.3 JUSTIFICATIVA	18
CAPÍTULO II.....	20
2. REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO	21
2.1 INTRODUÇÃO	21
2.2 CONCEITOS	24
2.2.1 Riscos	24
2.2.2 Suscetibilidade a incêndios	26
2.2.3 Severidade a incêndios	26
2.2.4 Vulnerabilidade a incêndios	27
2.3 RISCO INTEGRADO	28
2.3.1 Risco Estrutural	29
2.3.2 Risco Dinâmico	29
2.4 INCÊNDIOS	29
2.4.1 Fatores de ignição.....	30
2.4.2 Áreas de Ocorrências	30
2.4.3 Tipologias.....	32
2.4.4 O fogo e o Cerrado	34
2.4.5 Incêndios em Unidades de Conservação.....	35
2.4.6 Manejo Integrado do Fogo	36
2.5 METODOLOGIAS PARA MODELAGEM	38
CAPÍTULO III	40
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	41
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1.2 Risco Estrutural de Incêndio Florestal	43
3.1.3 Risco Dinâmico de Incêndio Florestal.	48
3.1.4 Risco Integrado de Incêndio Florestal.....	51
3.1.5 Severidade ao fogo	53
CAPÍTULO IV	56
4. CARACTERIZAÇÃO DA SERRA DA CANASTRA.....	57
4.1 Introdução	57

4.2 Geologia	58
4.3 Geomorfologia	58
4.4 Clima e Hidrografia	60
4.5 Vegetação	61
CAPÍTULO V	62
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
5.1 INTRODUÇÃO	63
5.2 Risco Estrutural de Incêndio Florestal	63
5.3 Risco Dinâmico de Incêndio Florestal	73
5.4 Risco Integrado de Incêndio Florestal	77
5.5 Quantificação da severidade das queimas	83
CAPÍTULO VI	90
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
REFERÊNCIAS	94

CAPÍTULO I



1. APRESENTAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

A Serra da Canastra integra o Parque Nacional da Serra da Canastra (PNSC), uma Unidade de Conservação inserida no bioma Cerrado. Diversos estudos indicam que esse bioma coevoluiu com o fogo, sendo a ocorrência desse fenômeno registrada há aproximadamente 32 mil anos AP (Nascimento, 2001b; Messias, 2018). Grande parte das espécies vegetais do Cerrado apresenta características que evidenciam adaptações a esse tipo de distúrbio, como a presença de raízes pivotantes e a capacidade de rebrotar ou florescer após a ocorrência de incêndios (Nascimento, 2016b).

No contexto do PNSC, registros históricos de Saint-Hilaire apontam que o uso do fogo já era uma prática adotada por povos originários desde o século XIX (Medeiros e Fiedler, 2004).

No entanto, a partir da segunda metade do século XX, as transformações no modo de vida e no uso do solo alteraram significativamente os regimes naturais de fogo. Dessa forma, embora o fogo seja um elemento recorrente no Cerrado, a ação antrópica passou a intensificar sua frequência e intensidade (Coutinho, 2016).

O fogo resulta da interação entre o combustível, oxigênio e calor, seu comportamento dentro de uma área florestal é condicionado pelas características do combustível vegetal, bem como fatores topográficos e climáticos, que influenciam a ignição, propagação e a intensidade dos incêndios florestais (Andrews e Williams, 1998; Pausas e Keeley, 2009).

Diante das alterações no regime natural do fogo decorrentes da interferência antrópica, o mapeamento de risco passou a se consolidar como uma estratégia fundamental para a mitigação de seus efeitos. No âmbito do conceito de risco, são mobilizados diferentes conceitos e abordagens analíticas que contribuem para aumentar a efetividade das avaliações e dos estudos, fornecendo subsídios mais robustos para a compreensão, o planejamento e a gestão do território.

Para Lourenço e Almeida (2018), o risco resulta da multiplicação da severidade, a qual reúne as respostas às questões onde (susceptibilidade), quando (probabilidade) e como (intensidade) o evento ocorre, pela vulnerabilidade. Esta, por sua vez, relaciona-se principalmente ao grau de exposição associado à presença humana, seja de forma direta, por meio da ocupação física do espaço, seja indireta, pela existência de infraestruturas e bens passíveis de serem afetados.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo geral

O objetivo principal desta dissertação consiste em realizar um mapeamento de risco, buscando por meio das características geomorfológicas e meteorológicas identificar as áreas mais suscetíveis à ocorrência de incêndio na Serra da Canastra.

Objetivos específicos

- Realizar uma revisão dos principais conceitos relacionados à temática, com ênfase em risco, suscetibilidade e severidade, bem como apresentar uma caracterização do bioma Cerrado e de sua relação ecológica com o fogo.
- Aplicar uma modelagem especial para identificar e classificar as áreas mais suscetíveis à ocorrência de incêndios na Serra da Canastra.
- Analisar a existência de relações espaciais entre as áreas classificadas com maior suscetibilidade e os padrões de severidade do fogo observados, a partir da integração com dados de focos de calor e cicatrizes de incêndio.

1.3 JUSTIFICATIVA

O PNSC consolida-se como uma área de preservação, refúgio para diversas espécies de plantas e animais, estabelecendo em seu interior áreas de nascentes e bacias hidrográficas de grande importância (Confessor, 2023). Possui cinco diretrizes relacionadas aos seus Recursos e Valores Fundamentais: a água, a cultura tradicional, o patrimônio arqueológico-histórico, o turismo e o Cerrado com sua biodiversidade. A água é um recurso abundante no PNSC, que abriga diversas nascentes, incluindo a nascente histórica do Rio São Francisco. A área é formada por extensos chapadões constituídos por rochas quartzíticas e aquíferos fissurais, funcionando como zonas estratégicas de recarga hídrica. A cultura tradicional é outro valor fundamental, marcada pela forte relação entre a comunidade local e o ambiente natural, destacando-se a produção do tradicional queijo Canastra e a prática agrícola, atividades de grande relevância socioeconômica. No que se refere ao patrimônio arqueológico e histórico, o parque preserva vestígios importantes, como muros, casas e currais de pedra, além de ruínas de antigas fazendas. Também se encontram sítios arqueológicos com pinturas rupestres, como as

localizadas em Letreiros e Samambaia, que representam registros da ocupação ancestral. O turismo é favorecido pelo mosaico paisagístico composto por serras, chapadões escarpados e vales formados por depressões intermontanas, cuja beleza cênica é complementada por elementos antrópicos, como casarões antigos e currais de pedra, conferindo ao parque elevado potencial para atividades turísticas sustentáveis (ICMBio, 2023).

Por fim, a biodiversidade do Cerrado é um dos principais valores do PNSC, com predomínio de formações campestres, matas ciliares e florestas, que abrigam espécies endêmicas e ameaçadas de extinção, reforçando a importância da unidade para a conservação ambiental (ICMBio, 2023).

Desde 2017, o parque adota práticas de Manejo Integrado do Fogo, seguindo as diretrizes do ICMBio, com a realização de queimas prescritas que têm como objetivos reduzir a carga de material combustível, prevenir incêndios de grandes proporções e manter os processos ecológicos associados ao fogo, essenciais para a conservação do Cerrado (ICMBio, 2023).

Dentro da geografia física, a modelagem se consolidou como importante ferramenta de análise de pesquisa, atuando como complemento de investigação de campo, ajudando a superar limitações associadas a altos custos (Fernandes, 2016). A partir dos modelos é possível prever comportamentos futuros de sistemas ambientais, testar hipóteses e teorias ou representar de forma mais simplificada a realidade (Christofolletti, 1982; Fernandes, 2016).

Compreender a dinâmica ambiental da Serra da Canastra a partir da suscetibilidade ao fogo possibilita um entendimento mais aprofundado das relações espaciais e dos processos que determinam as áreas que demandam maior atenção no contexto da gestão e conservação desse ambiente.

CAPÍTULO II



2. REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO

2.1 INTRODUÇÃO

Diversos estudos têm demonstrado que as propriedades ecológicas dos regimes de incêndio exercem papel determinante na configuração e na distribuição dos biomas em escala global (Bond et al., 2005; Pausas and Keeley, 2021; Pivello e Fideliss, 2025). O fogo, portanto, é reconhecido como um fator global de controle da estrutura da vegetação.

Nesse contexto, o fogo sempre esteve presente na história e no desenvolvimento da sociedade (Santos et al., 2017), podendo ser considerado como uma ferramenta indispensável para sobrevivência e manutenção da Terra, atuando como um componente modelador da paisagem e dos processos ecológicos de determinados ecossistemas (Ramalho et al., 2024).

Existem evidências que sugerem que os regimes de fogo contribuem significativamente para explicar a diversidade vegetal tanto em escala comunitária, quanto global (He et al., 2019). Considerando essa ideia, Hardesty et al., (2005) defendem a ideia de que os biomas e ecossistemas dividem-se entre dependentes, sensíveis e independentes ao fogo. Onde os ambientes sensíveis são formados por espécies vegetais e animais que não possuem adaptações para tolerar o evento, o que lhes causa sérios problemas. Em contraste, em lugares onde as plantas apresentam inflamabilidades, cascas grossas e o comportamento de escavação em animais são considerados dependentes ou influenciados pelo fogo. Enquanto os independentes são ecossistemas onde o fogo raramente acontece (Pivello et. al., 2021).

Essa classificação considera os regimes naturais de incêndios, onde as interações auto-reforçadoras entre o clima, a vegetação e a ocorrência de incêndios levaram a “regimes de fogo” distintos, definidos pela duração temporal, frequência, extensão e padrão de comportamento característico (Bowman et al., 2020).

Os seres humanos exercem influência significativa sobre os regimes de incêndio por meio de múltiplas formas de intervenção. Essa influência pode ocorrer pela alteração dos tipos e da disponibilidade de combustíveis, pela modificação da estrutura e da continuidade da biomassa combustível, bem como pela indução de eventos de queima em diferentes estações do ano e sob variadas condições climáticas (Bowman et al., 2011). Trata-se de uma situação que acontece desde o período Paleolítico e o Mesolítico, quando o fogo era usado para limpeza de áreas, transformando-as em locais habitáveis, além de ser utilizado para facilitar a caça, promover a regeneração vegetal e fornecer alimento tanto para humanos quanto para animais (Bento-Gonçalves, 2022, p. 16). Contudo, as atividades humanas recentes têm promovido

alterações significativas no regime do fogo, mudando a sazonalidade, intensidade e severidade, frequência e extensão dos incêndios (Berlinck e Batista, 2020).

A partir da década de 1980, verificou-se um aumento expressivo na frequência, duração e intensidade dos grandes incêndios, fenômeno registrado especialmente em ecossistemas temperados e de altas latitudes nas últimas décadas. Essa intensificação coincide com condições climáticas cada vez mais favoráveis à ocorrência de incêndios florestais, impulsionadas por fatores populacionais, socioeconômicos e gestão da terra, e associando se também aos fatores climáticos (Abatzoglou e Williams, 2016; McClure e Jaffe, 2018; Pausas e Keeley, 2009).

De 1979 a 2013, foi documentado um aumento médio de 18,7% na duração de incêndios florestais em áreas de vegetação inflamável em todo o mundo. No Canadá, a média anual de áreas queimadas praticamente triplicou desde 1959, passando de aproximadamente 1 milhão para 2,8 milhões de hectares (Bowman et al., 2020). Nos Estados Unidos, as destruições de casas por incêndios aumentaram 300% entre 1990 e 2014 (Ghermandi et al., 2024). Episódios extremos também foram registrados durante o verão de 2018, em lugares como Austrália, Grécia, Escandinávia e Reino Unido que enfrentaram incêndios florestais de magnitude excepcional (Turco et al., 2019). No contexto brasileiro, o segundo semestre de 2024 foi marcado por intensos incêndios florestais. No dia 9 de setembro, a cidade de São Paulo chegou a ser classificada pela plataforma *IQAir* como a cidade com a pior qualidade do ar do mundo, em decorrência desses eventos (Souza et al., 2024).

As intensificações que modificam o regime do fogo podem resultar em fragmentação da paisagem, alterações nas propriedades do solo, tornando espécies nativas mais vulneráveis (Castillo S. et al., 2020). Durante a ocorrência de incêndios, grandes quantidades de vapor de água, CO₂, CH₄, N₂O e aerossóis são liberadas, modificando o balanço radioativa da Terra, os aerossóis reduzem a transmissão de energia solar para superfície terrestre, enquanto os gases de efeito estufa retêm a radiação solar. Os incêndios intensos podem desencadear o desenvolvimento de tempestades de pirocumulonimbus, que por sua vez, causam reação em cadeia, impulsionando o comportamento do fogo, criando raios que atingem o solo e promovem novos episódios de incêndios (Bowman et al., 2020).

Mesmo em ambientes dependentes, que possuem espécies de plantas com ciclo de vida ligado diretamente ao regime do fogo, o desvio do mesmo, seja por exclusão, ou aumento da frequência e intensidade, pode resultar em declínio populacional ou extinção total (Bowman et al., 2020).

Retomando a classificação de Hardesty et. al., (2005), no Cerrado o fogo exerce influência direta sobre o desenvolvimento dos troncos e ramos dos indivíduos lenhosos,

conferindo-lhes a aparência tortuosa característica. Segundo Coutinho (1976), esse padrão morfológico resulta da morte recorrente das gemas apicais causada pelas queimadas, o que leva as plantas a crescerem predominantemente por brotação e pelo desenvolvimento de gemas laterais. Além disso, a presença de indivíduos arbóreos de pequeno porte, a fisionomia foliar tipicamente caducifólia e a alta germinabilidade de sementes após eventos de queimada reforçam essa dinâmica ecológica. De modo geral, Coutinho conclui que a vegetação do Cerrado configura-se como uma “vegetação clímax do fogo” (Nascimento, 2001).

Embora o Cerrado seja amplamente reconhecido como um bioma dependente do fogo, as dinâmicas observadas atualmente evidenciam o expressivo impacto da interferência humana sobre seus regimes de queima. O bioma tem apresentado taxas elevadas de incêndios florestais durante a estação seca, em grande parte associadas ao uso do fogo para limpeza de áreas destinadas às atividades agrícolas (da Silva Arruda et al., 2024). Já em 1976, Coutinho apontava a ação humana como o principal agente desencadeador de incêndios, superando a ocorrência de queimadas naturais.

Com a consolidação do Cerrado como a principal fronteira de expansão agrícola do Brasil, tornou-se frequente a prática de queimas controladas para a remoção da vegetação e preparação do solo para cultivos como soja, milho e algodão. Além disso, o fogo é amplamente empregado no manejo de pastagens, tanto para renovação da biomassa quanto para estimular o rebrote de gramíneas destinadas à pecuária (da Silva Arruda et al., 2024; Gomes et al., 2019).

Nesse contexto, emerge a necessidade de desenvolver modelagens capazes de prever, prevenir e mitigar a ocorrência de incêndios, usando de abordagens integradas para avaliar riscos ambientais (Bonazountas et al., 2005). Os mapas de risco de incêndios têm sido empregados por diversos países (Carmel et al., 2009).

Na Turquia, por exemplo, a Direção Regional de Silvicultura de Muğla aplicou índices de vegetação (NBR, NDWI e NDVI) para classificar o risco de incêndios em quatro níveis, conforme demonstrado por Sivrikaya et al., (2024). No Brasil, Fernandes, (2019), utilizou Redes Neurais Artificiais (RNA) para modelar o risco de incêndios na Região Metropolitana de Belo Horizonte, em Minas Gerais. Em Portugal, na região do Minho, (Bento-Gonçalves et al., 2014a) analisaram a vulnerabilidade a incêndios florestais por meio da exposição, sensibilidade e capacidade de antecipação e resposta do ambiente. Na China, Zhang et al., (2019) por meio de uma Rede Neural Convolucional (CNN) estudaram a suscetibilidade a incêndios na região de Yunnan.

2.2 CONCEITOS

2.2.1 Riscos

A teoria de risco foi desenvolvida por diversos autores, como Faugères, 1990; Hadjiconstantinou, 1990; Moustafa, 1990. Rebelo, 1995, 1996, 1997b, 2014 (Lourenço e Almeida, 2018).

Em 1989, em Saint-Valery-sur-Somme, na França, durante o seminário “*Risques naturels, risques technologiques*”. *Gestion des risques, gestion des crises*”, Lucien Faugères fez o enquadramento de diversos conceitos, a partir dos quais foram lançados os fundamentos da teoria do risco (Lourenço e Dias, 2020). Os quais baseiam-se em três conceitos-chave: risco, perigo e crise. O perigo está associado à sensação de proximidade com um fator potencialmente danoso, enquanto a crise representa a concretização desse dano (Rebelo, 1999).

Conforme argumenta Faugères (1990), o risco constitui “*um sistema complexo de processos cuja modificação de funcionamento é suscetível de acarretar prejuízos diretos ou indiretos (perda de recursos) a uma dada população*”. A partir dessa concepção, entende-se que a incerteza associada à ocorrência de um determinado evento corresponde ao processo de suscetibilidade, enquanto os prejuízos potenciais dizem respeito à vulnerabilidade da população afetada (Lourenço e Almeida, 2018).

Para Berwig e Engelmann (2023) o risco é uma incerteza de ocorrência, considerando que o incerto não é algo (in)existente, podendo ser uma hipótese, algo que ainda não foi verificado ou constatado.

Para além dos dois conceitos previamente apresentados, o modelo conceitual para a determinação do nível de risco incorpora ainda as dimensões de probabilidade e intensidade (Lourenço e Amaro, 2018). A probabilidade refere-se à chance de ocorrência de determinado evento, enquanto a intensidade diz respeito ao modo como o fenômeno se manifesta, considerando sua localização no espaço e sua possibilidade de ocorrência no tempo. Assim, a combinação entre intensidade e suscetibilidade compõe a severidade do risco, que busca responder às seguintes questões fundamentais: *onde, quando e como* o evento pode ocorrer (Lourenço e Almeida, 2018).

A vulnerabilidade é composta por três elementos fundamentais: a exposição, que se refere ao território, aos bens e às populações potencialmente afetadas, a sensibilidade, entendida como o nível e a extensão dos danos possíveis, aproximando-se do conceito de vulnerabilidade

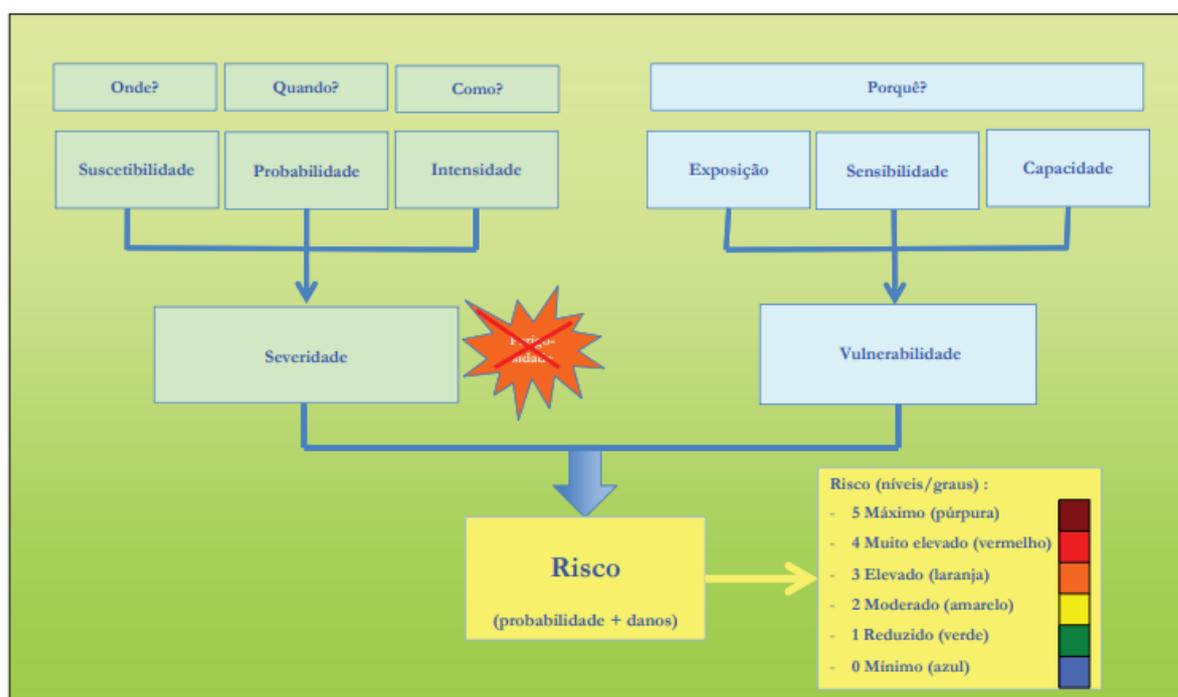
física; e a capacidade, subdividida em capacidade de antecipação e capacidade de resposta frente ao evento adverso (Lourenço e Almeida, 2018).

Para as Nações Unidas, a vulnerabilidade corresponde às “*características e circunstâncias de uma comunidade que a tornam suscetível aos efeitos nocivos do processo*” (Lourenço e Almeida, 2018, p.45).

O conceito é expresso na prática no sentido oposto ao da resistência (física, social, econômica, entre outras) dos territórios e comunidades. É possível elaborar um modelo conceitual, estabelecendo diferentes níveis para cada risco (com escala de 0 a 5), o modelo conceitual de risco pode ser expresso pela relação:

$$\text{Risco} = \text{Severidade} \times \text{Vulnerabilidade} \text{ (Fig. 1).}$$

Figura 1 - Modelo conceitual para determinar o grau de risco.



Fonte: Lourenço e Almeida, (2018).

Os fatores que compõem a vulnerabilidade são determinantes para as características e a magnitude dos danos potenciais. Nesse sentido, sua análise deve contemplar aspectos como a localização das áreas expostas, a resistência estrutural e social, a capacidade de antecipação e resposta, a existência de sistemas de alerta, planos de evacuação, entre outros elementos. No entanto, para fins de avaliação e comparação, a vulnerabilidade deve ser expressa por meio de indicadores quantificáveis, tais como a estimativa dos danos potenciais ou o número de pessoas afetadas (Lourenço e Almeida, 2018).

Relacionando a Teoria do Risco com os incêndios, entende-se que o risco de incêndio está sempre presente, enquanto o perigo está relacionado às condições que aumentam a

probabilidade de sua ocorrência, como o aumento das temperaturas durante períodos de estiagem prolongada, e a crise se instaura a partir da primeira faísca a propagação em larga escala do fogo. Os autores, Verde e Zêzere (2007), definem que o risco é a probabilidade de que um incêndio florestal ocorra em um local específico sob determinadas circunstâncias, e as suas consequências esperadas pelos impactos nos objetos afetados.

2.2.2 Suscetibilidade a incêndios

A suscetibilidade refere-se à propensão de uma determinada área ser afetada por um fenômeno, considerando as propriedades que lhe são intrínsecas. No caso dos incêndios florestais, uma área apresenta maior suscetibilidade quanto mais suas características físicas, biológicas e ambientais favorecem a deflagração e/ou a propagação do fogo (Verde e Zêzere, 2007).

O conceito de suscetibilidade a incêndios florestais apresenta múltiplas definições na literatura. Devido a amplitude e complexidade do debate teórico sobre o tema, Chicas e Østergaard Nielsen (2022) elaboraram uma revisão sistemática da literatura de 2001 a 2021, identificando os principais fatores básicos utilizados em modelos para mapear e identificar os atores que causam a suscetibilidade a incêndios florestais, identificando mais de 30 métodos diferentes para esse objetivo (Kantarcioğlu et al., 2023).

Entre os fatores considerados, os topográficos são os mais utilizados (33%), seguidos pelos antrópicos, como distância das rodovias e residências, densidade populacional, uso do solo (27%), climáticos, como a temperatura, umidade, radiação (21%) e ambientais, como NDVI, tipo de solo, distância dos corpos d'água (19%). Os autores identificaram dez fatores mais empregados nos estudos e destacaram cinco considerados essenciais para a modelagem da suscetibilidade: declividade, elevação e orientação das vertentes; distância das estradas e distância de áreas residenciais; além de variáveis relacionadas ao uso e cobertura da terra, NDVI, temperatura, precipitação e velocidade do vento (Chicas e Østergaard Nielsen, 2022).

A otimização de um sistema de gestão de incêndios florestais requer uma análise abrangente da suscetibilidade ao fogo em função de fatores de influências locais (Kantarcioğlu et al., 2023).

2.2.3 Severidade a incêndios

Conforme apresentado no modelo conceitual, o risco resulta da interação entre a vulnerabilidade e a severidade, sendo esta última um conceito que reúne as questões de

suscetibilidade (onde), probabilidade (quando), e intensidade (como) do fenômeno que aconteceu (Luciano e Almeida, 2018).

Em sua dissertação de mestrado, Verde (2008) utiliza o termo como um indicativo de perigosidade. Enquanto, Lourenço e Almeida (2018) afirmam que ele se refere a processos potencialmente perigosos, propondo a substituição do termo perigosidade por severidade, sob a justificativa de que nem toda manifestação de um processo implica, necessariamente, a existência de perigo. Além disso, os autores destacam que o conceito de severidade pode englobar os danos resultantes do impacto do processo.

Considerando a severidade dos incêndios florestais, é importante destacar que ela promove alterações em diferentes componentes do ecossistema, com ênfase nas mudanças na paisagem, bem como nas propriedades bioquímicas, físico-químicas e na dinâmica dos nutrientes do solo (Fidalgo e Fernandes, 2023).

Para Keeley (2009), a severidade do fogo indica a perda ou mudança na matéria orgânica tanto acima, quanto abaixo do solo, sendo considerada pelo impacto físico imediato da combustão.

Os estudos mais recentes utilizam o termo para medir o impacto ou a magnitude do fenômeno sobre o ambiente, como Wassner et al. (2025), que fizeram uma análise da recuperação da vegetação em comparação da severidade do incêndio, em Arganil, Portugal. Lewis et al. (2024) estudaram a regeneração de espécies vegetais a partir de diferentes níveis de severidade do fogo, no Arizona, Novo México.

Para Luciano e Almeida (2018), o risco só é objeto de estudo porque acarreta consequências, sempre que se manifesta com alguma severidade.

2.2.4 Vulnerabilidade a incêndios

A vulnerabilidade relaciona-se ao grau de perda potencial associado à ocorrência de um determinado fenômeno, sendo usualmente expressa em uma escala contínua de 0 a 1. Nessa escala, o valor 0 corresponde à ausência de danos, enquanto o valor 1 representa perda total dos elementos expostos. (Verde e Zêzere, 2007).

Com base no livro *“Riscos e Crises: Da teoria a plena manifestação”*, é necessário distinguir a manifestação do processo natural (evento físico) da manifestação do risco (consequências negativas para o ser humano), isso porque para Lourenço e Almeida (2018), o fenômeno natural transforma-se em risco quando existe a presença ou atividade humana exposta a eles.

A vulnerabilidade revela as fragilidades e as capacidades das pessoas e sistemas de passar pela experiência do perigo, cada conjunto de características configura lugares específicos que possuirão elementos particulares que poderão potencializar ou minimizar os danos (Maradona Jr, 2009).

A definição de vulnerabilidade é amplamente debatida na literatura. Para Tedim e Carvalho, (2013) trata-se da propensão, suscetibilidade ou fragilidade/sensibilidade dos ecossistemas e dos sistemas humanos a sofrerem danos quando expostos a um incêndio florestal. Já Alloza et al., (2006) definem vulnerabilidade como a suscetibilidade de o ecossistema sofrer alterações em decorrência do fogo, considerando uma dupla dimensão temporal: no curto prazo, manifestada principalmente por processos erosivos; e no médio prazo, refletida em mudanças na composição e na estrutura da vegetação.

Nos Alpes Franceses, Dupire et al., (2019) avaliaram a vulnerabilidade ao fogo utilizando a mortalidade de diferentes espécies após incêndio. No Brasil, Carvalho, (2021) desenvolveu um estudo para identificar as áreas mais vulneráveis a incêndios no Parque Nacional de Brasília (PNB), utilizando como indicadores a ocorrência e concentração de focos de calor ao longo do tempo.

Na região do Minho, em Portugal, Bento-Gonçalves et al., (2014b), analisaram a vulnerabilidade por meio de três dimensões principais: exposição, relacionada à presença de pessoas, bens ou outros elementos sujeitos aos impactos; sensibilidade, definida pelas condições que aumentam ou reduzem a propensão ao dano; e capacidade de antecipação e resposta, entendida como o conjunto de recursos e mecanismos disponíveis para lidar com o evento.

2.3 RISCO INTEGRADO

O desenvolvimento de um índice de risco de incêndios florestais requer a consideração integrada de um amplo conjunto de fatores, tradicionalmente agrupados em combustíveis, topografia e condições meteorológicas (Freire et. al., 2002). A diversidade de variáveis selecionadas e dos métodos empregados para sua combinação resulta em uma multiplicidade de abordagens metodológicas voltadas à cartografia do risco de incêndios, refletindo tanto as especificidades ambientais quanto os objetivos de cada estudo (Chicas and Østergaard Nielsen, 2022; Freire et. al, 2002).

Entre as abordagens consolidadas na literatura, destaca-se a proposta apresentada por Caetano et al., (2004) e Freire et al. (2002), fundamentada no Projeto de Incêndios Florestais

do Joint Research Centre (JRC), desenvolvido em 2002 com o objetivo de subsidiar as autoridades europeias no monitoramento, prevenção e gestão de incêndios florestais. Nessa metodologia, os autores propõem a organização dos índices de risco em três categorias fundamentais: risco estrutural, risco dinâmico e risco integrado.

2.3.1 Risco Estrutural

O índice de risco estrutural baseia-se na combinação de variáveis que não apresentam variações significativas em curto intervalo de tempo, tais como altitude, declividade, orientação das vertentes, proximidade de estradas e áreas urbanas, histórico de incêndios, densidade populacional, entre outros fatores físicos e antrópicos (Freire et al., 2002). Esse índice está diretamente relacionado à probabilidade de ignição, sendo geralmente calculado antes do início da temporada crítica de incêndios, com o objetivo de subsidiar o planejamento estratégico das ações de prevenção, monitoramento e combate (Caetano et al., 2004).

Trata-se de um índice com aplicação predominantemente local ou regional, uma vez que os fatores estruturais e sua importância relativa variam conforme as características ambientais, sociais e territoriais de cada área analisada (Caetano et al., 2004).

2.3.2 Risco Dinâmico

O índice de risco dinâmico fundamenta-se em parâmetros que apresentam variação contínua ou quase contínua ao longo do tempo, como as condições climáticas (temperatura, precipitação, umidade relativa, vento) e o estado da vegetação, frequentemente representado por índices espectrais, como o NDVI (Souza, 2022). Esse índice tem como principal objetivo detectar alterações graduais e persistentes na inflamabilidade dos combustíveis florestais, refletindo a influência direta das condições atmosféricas e do ciclo fenológico da vegetação (Caetano et al., 2004).

A quantidade, distribuição espacial e continuidade da cobertura vegetal constituem variáveis críticas na previsão do perigo de incêndios, uma vez que controlam tanto a disponibilidade de combustível quanto o potencial de propagação do fogo. Assim, o risco dinâmico desempenha papel central na avaliação sazonal da suscetibilidade aos incêndios (Caetano et al., 2004).

2.4 INCÊNDIOS

O fogo resulta da interação entre combustível, oxigênio e calor, elementos que compõem o denominado triângulo do fogo. A interrupção de qualquer um desses componentes é suficiente para cessar o processo de combustão (Pausas e Keeley, 2009). Contudo, ao se considerar o contexto das áreas florestais, essa dinâmica torna-se mais complexa. Nesse ambiente, o comportamento do fogo é fortemente condicionado pelas características do combustível vegetal, bem como por fatores topográficos e climáticos, os quais influenciam a ignição, a propagação e a intensidade dos incêndios florestais (Andrews e Williams, 1998).

2.4.1 Fatores de ignição

Para falar sobre os fatores de ignição, é necessário retomar ao triângulo do fogo, nesse contexto, ele sofre influência do combustível, da topografia e do clima, a variação entre esses elementos pode resultar em um risco maior de propagação do fogo, ou usada como estratégia de mitigação (Andrews e Williams, 1998).

Os combustíveis terrestres constituem o material orgânico totalmente decomposto, em contato com a camada inorgânica, incluindo as raízes, turfa, madeira e galhos em decomposição, entre outros (Messias, 2018). Eles podem ser classificados com base na sua distribuição vertical e horizontal, dimensão, quantidade, umidade do combustível e combustibilidade (Castro et Al, 2006).

A topografia exerce papel na modificação das condições ambientais e físicas de uma área, influenciando diretamente o comportamento do fogo (Allgower, 2003). A altitude afeta a umidade do combustível vegetal, tanto em função da variação térmica quanto da orientação das vertentes, que condiciona a incidência de radiação solar e, conseqüentemente, os níveis de secagem da biomassa. A declividade do terreno também é um fator determinante, uma vez que encostas mais íngremes favorecem o rolamento de materiais incandescentes, facilitando a ignição de novas áreas e acelerando a propagação do fogo. Além disso, a configuração do relevo pode induzir a formação de padrões locais de vento, os quais contribuem para o transporte de calor e chamas, aumentando a velocidade e a intensidade dos incêndios florestais (Rothermel, 1983).

O comportamento do fogo é fortemente condicionado pelas variáveis climáticas, uma vez que o regime climático influencia diretamente a fisionomia e a distribuição da cobertura vegetal de uma região, desempenhando papel dominante na formação de áreas mais suscetíveis à ocorrência de incêndios florestais (Messias, 2018).

Segundo Rothermel (1983), o clima é representado pelas variáveis meteorológicas de curto prazo, constitui o componente mais dinâmico e determinante para a ignição e propagação do fogo. A temperatura do ar, em conjunto com a umidade relativa, controla a umidade dos combustíveis mortos finos, enquanto a radiação solar atua diretamente no processo de secagem desses materiais. Dessa forma, as condições meteorológicas exercem influência decisiva sobre a intensidade, a propagação e a severidade dos incêndios florestais.

2.4.2 Áreas de Ocorrências

A distribuição de queimadas ao longo do planeta é um fenômeno mundial que ocorre em todos os continentes vegetados, variando em intensidade e frequência, formando o que os

ecologistas chamam de “regime do fogo”, que está diretamente ligado aos tipos de vegetação e padrões climáticos (Bowman et al., 2009).

Cada ecorregião apresenta atributos ecológicos e funcionais específicos, estabelecendo relações distintas com a ocorrência do fogo. Por exemplo, as gramíneas tropicais típicas de biomas savânicos da África, Austrália e Américas produzem grandes quantidades de combustíveis finos, que se tornam altamente inflamáveis durante os períodos secos (Bowman et al., 2009).

Nesse contexto, Hardesty et al., (2005), classificaram os ecossistemas em três grandes grupos, de acordo com sua interação com o fogo: ecossistemas dependentes do fogo, independentes do fogo e sensíveis ao fogo. Em paralelo, Pivello et al., (2021), adaptaram essa classificação à realidade dos biomas brasileiros, fundamentando-a principalmente na vegetação predominante. Contudo, mesmo dentro de um mesmo bioma, observa-se uma expressiva heterogeneidade estrutural e funcional, o que resulta na presença de mosaicos e manchas com diferentes regimes e respostas ao fogo no interior de uma mesma classe ecológica.

Como exemplo, Pivello et al. (2021) destacam que as florestas tropicais atlânticas, geralmente classificadas como ecossistemas sensíveis ao fogo, podem conter, em seu interior, fitofisionomias abertas, como campos arbustivos, que apresentam elevada inflamabilidade. Ressalta-se que esses exemplos se referem a condições naturais.

Além disso, altas temperaturas, baixa umidade relativa do ar e vegetação seca, combinadas com as ações antrópicas, como uso do solo para pastagens, contribuem significativamente para a propagação de incêndios (Fernandes et al., 2011).

No sul da Europa, as transformações socioeconômicas modificaram os modos de vida locais, resultando no abandono de extensas áreas agrícolas, o que favoreceu o acúmulo de biomassa, e tornou essas áreas mais suscetíveis a ocorrência de grandes incêndios (Bento-Gonçalves, 2024).

Ainda em Portugal, na região de Baião, foi identificado que os incêndios de maiores dimensões estavam associadas a áreas de vegetação densa, com moradias dispersas, locais abandonadas pela agricultura e áreas de interface urbano-florestal (Santos et al., 2023).

Os anos de 2019 e 2020 foram caracterizados por temporadas intensas de incêndios, que afetaram aproximadamente 19 milhões de hectares. As investigações indicam que essas ocorrências resultaram da convergência de múltiplos fatores, incluindo condições meteorológicas extremas, fragilidades nas políticas ambientais e o crescimento populacional desordenado (Mondragón, 2021).

Na Sierra Nevada, Califórnia, as florestas têm sido afetadas por incêndios recorrentes, os quais têm provocado alterações significativas na composição da fauna de micromamíferos da região, favorecendo a seleção e expansão de espécies generalistas (Kelt et al., 2016).

De acordo com os documentos de trinta anos de Conferências Internacionais sobre Incêndios, observa-se uma tendência global de aumento na ocorrência de incêndios florestais. Esse cenário caracteriza-se pelo aumento da intensidade e da extensão das áreas queimadas, pela ampliação da duração das temporadas de incêndio, pelo crescimento da frequência dos eventos e por mudanças significativas nos regimes de fogo, que passam a apresentar padrões distintos daqueles historicamente observados (Goldammer, 2021).

2.4.3 Tipologias

Diante da necessidade de aprofundamento do conhecimento científico e de subsidiar discussões de natureza legal, institucional e política relacionadas à temática do fogo, diversos autores têm abordado o fenômeno a partir de conceitos-chave, tais como: Bento-Gonçalves et al., 2012; Pivello et al., 2021; Ramalho et al., 2024.

O conceito de incêndios florestais apresenta variações conforme o contexto nacional e institucional. Nesse contexto, Bento-Gonçalves et al., (2012) publicaram um artigo que trabalha os conceitos-chaves e estudos recentes a respeito do tema.

Diversos termos são empregados globalmente para descrever incêndios de vegetação que ocorrem fora do ambiente urbano. Nos Estados Unidos, o termo *wildland fire* é considerado "qualquer incêndio que não seja em uma estrutura e que ocorra em área selvagem, incluindo *wildfire*, uso do fogo em áreas selvagens e fogo prescrito" (National Wildfire Coordinating Group, 2011). Na Austrália, o termo *bushfire* é usado para descrever qualquer incêndio de vegetação (Australasian Fire Authorities Council, 2010). Além disso, o termo genérico *wildfire* é utilizado para descrever qualquer incêndio de vegetação não planejado, incluindo incêndios em campos, florestas e vegetação rasteira (Australasian Fire Authorities Council, 2010). O termo "*forest fire*" é empregado pelo Instituto para o Meio Ambiente e Sustentabilidade do Centro de Pesquisa Conjunta da Comissão Europeia (Comissão Europeia, 2010) em seu relatório anual sobre incêndios em países europeus. No Canadá, os termos *forest fire* e *wildfire* são definidos pelo Centro Interagências Canadense de Incêndios Florestais (2003).¹ (Bento-Gonçalves et al., 2012, p. 5-6). [Tradução livre]

Os incêndios florestais podem ser classificados de acordo com seu comportamento, localização, posição do combustível consumido ou com o tipo de combustão envolvida. Os estudos de Cochrane e Ryan (2009), distinguem três tipos principais de incêndios florestais: incêndios de superfície, incêndios de subsuperfície e incêndios de copas.

Os incêndios de superfície caracterizam-se pela queima dos combustíveis localizados sobre o solo, incluindo folhas secas, galhos mortos, serapilheira e vegetação rasteira. Os incêndios de subsuperfície, por sua vez, consomem a matéria orgânica situada abaixo da camada superficial da serapilheira, como turfas e húmus, podendo permanecer ativos por longos períodos devido à combustão lenta e pouco visível. Já os incêndios de copas propagam-se por meio das copas de árvores ou arbustos, apresentando elevado potencial de intensidade e severidade, sendo frequentemente associados a maiores danos ecológicos e maior dificuldade de controle.

Os megaincêndios também são incêndios florestais, mas para além da extensão da área queimada, que vai de centenas a milhares de hectares, eles destacam-se por intensidade, severidade, longa duração e dificuldade de controle (Fideliss et al., 2018).

¹ Several terms are used across the globe to describe vegetation fires in areas outside the urban environment. In the United States the term *wildland fire* is considered "any non-structure fire that occurs in the wildland and includes *wildfire*, *wildland fire* use, and *prescribed fire*" (National Wildfire Coordinating Group, 2011). In Australia the term *bushfire* is used to describe any vegetation fire (Australasian Fire Authorities Council, 2010). In addition, the generic term *wildfire* is used to describe any unplanned vegetation fire including grass fires, forest fires and scrub fires (Australasian Fire Authorities Council, 2010). The term "forest fire" is used by the European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability (European Commission, 2010) in their annual report on fires in European countries. In Canada the terms *forest fire* and *wildfire* are defined by the Canadian Interagency Forest Fire Center (2003).

As práticas de queima são classificadas em duas modalidades, a queima controlada e a queima prescrita.

A queima controlada consiste no uso intencional do fogo como ferramenta agropastoril ou florestal, sendo realizada sob condições ambientais previamente estabelecidas, dentro de uma janela de queima definida, em áreas com limites físicos claramente delimitados e com comportamento do fogo previamente planejado e desejado. A queima prescrita, por sua vez, é aplicada com finalidade conservacionista, sendo utilizada como instrumento de manejo em unidades de conservação. Assim como a queima controlada, é executada sob condições ambientais específicas e dentro de uma janela de queima adequada. No entanto, seu objetivo principal é a manutenção ou a restauração de processos ecológicos, podendo resultar na formação de mosaicos de áreas queimadas (MMA/ICMBio, 2022).

Além das tipologias de incêndio, existem termos e conceitos que se relacionam e fornecem o auxílio necessário para lidar com a temática. Esses estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Glossário dos termos e conceitos de incêndio

Glossário:

Borda do fogo	Qualquer área que alcance o perímetro do fogo.
Cicatriz do Fogo	Impressão deixada pelo fogo na área queimada, caracterizada por alterações na vegetação, no solo e na coloração da paisagem.
Comportamento do fogo	A maneira como um incêndio começa, se desenvolve e se propaga.
Regime do fogo	Padrão espacial e temporal de sazonalidade, de intensidade, de frequência, de extensão e de severidade na ocorrência do fogo em determinada localidade.
Temporada de incêndios	Corresponde ao período do ano em que os incêndios são mais prováveis, levando as agências de defesa a organizarem estratégias de combate e controle.
Janela de queima	Período mais favorável para o uso do fogo, em que as condições meteorológicas, de combustível e de outros indicativos ambientais são adequadas para o alcance dos objetivos específicos de manejo.
Propagação do fogo	Movimento do fogo através dos combustíveis disponíveis distribuídos na paisagem, influenciado por fatores como tipo de vegetação, topografia, condições meteorológicas e continuidade do material combustível.
Severidade do fogo	Está relacionado aos impactos ecológicos negativos causados nos ecossistemas, sendo proporcional à intensidade e duração do fogo. A severidade pode ser avaliada por meio da perda de matéria orgânica do solo e da vegetação, incluindo a taxa de mortalidade de organismos
Intensidade do fogo	Definida como a quantidade de energia liberada na frente de propagação do fogo. Em um sentido mais amplo, representa a potência energética total do evento

Fonte: Adaptado de MMA/ICMBio, (2022) e Pivello et al., (2021).

2.4.4 O fogo e o Cerrado

Grande parte das espécies vegetais do Cerrado apresenta raízes pivotantes profundas, permitindo que frutifiquem e se reproduzam mesmo durante a seca. Além disso, diversos estudos indicam a presença de xilopódios — órgãos lenhosos subterrâneos de reserva e rebrota — que desempenham papel fundamental na proteção das plantas frente à ação do fogo. Esses é um dos motivos que indicam que trata-se de um bioma adaptado ao fogo (Nascimento, 2001b).

A ocorrência do fogo no bioma Cerrado remonta a aproximadamente 32 mil anos AP (antes do presente), configurando-se como um componente histórico e recorrente da dinâmica ambiental da região. De modo geral, os registros indicam a predominância de incêndios de superfície, os quais consomem principalmente a vegetação do estrato herbáceo, característica típica das formações savânicas (Messias, 2018).

Evidências paleoambientais corroboram essa longa história do fogo no Cerrado. Estudos identificaram a presença de carvão vegetal datado do final do Pleistoceno, obtido por meio de análises de registros polínicos, fragmentos de carvão e técnicas de fluorescência de raios X (XRF), a partir de sedimentos da Lagoa Feia, localizada em Formosa, próxima ao Planalto Central (Cassino et al., 2020).

O cerrado brasileiro, chamado de Savana Tropical Estacional por Coutinho (2016), tem seu principal centro de distribuição no Planalto Central do Brasil. O bioma caracteriza-se por extensas superfícies aplainadas e sedimentares, com altitudes que variam aproximadamente entre 300 m e 1.700 m. Essas superfícies são marcadas por interflúvios amplos e vertentes suavemente onduladas, que convergem para vales ocupados por rios e riachos responsáveis pela drenagem regional.

Com o processo de colonização, os modos de vida dos povos originários foram substituídos pelo sistema econômico europeu, a qual introduziu a pecuária extensiva como principal atividade econômica, e exploração garimpeira em determinadas regiões. Nesse contexto, o uso do fogo passou a ser incorporado de forma sistemática como ferramenta para a renovação das pastagens, intensificando sua frequência e alterando os regimes naturais de queima. Registros históricos já indicavam a ocorrência recorrente de incêndios associados a essas práticas. Na região da Serra da Canastra, por exemplo, há relatos do uso do fogo no século XIX, descritos por Auguste de Saint-Hilaire (Medeiros e Fiedler, 2004).

O intenso processo de ocupação do Cerrado brasileiro desencadeou elevados índices de desmatamento, resultando em sérios impactos ambientais, como a intensificação dos processos erosivos, a perda de solo e a redução significativa da biodiversidade, com consequente empobrecimento do banco genético de espécies animais e vegetais (Nascimento, 2001b).

A partir da segunda metade do século XX, a Revolução Verde, seguida pela criação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), instituição responsável pela disseminação das tecnologias associadas a esse modelo produtivo, promoveu profundas transformações no uso e na ocupação do solo no Cerrado (Franco, 2001).

Mesmo o fogo sendo comum em todas as savanas do mundo, o homem, com sua atividade incendiária, aumentou em muito sua incidência (Coutinho, 2016).

As modificações foram no regime do fogo, alterações aconteceram na sazonalidade, frequência e origem das queimadas. A redução do intervalo entre os eventos de queima impede a recuperação completa dos ecossistemas, comprometendo os processos de regeneração e

resultando em alterações significativas na estrutura e na diversidade da vegetação (Miranda, et. Al, 2010).

Esse cenário é agravado pelas mudanças climáticas, especialmente pela diminuição dos volumes de precipitação e pelo aumento das temperaturas. Como consequência, o fogo passa a atingir formações vegetais que não seriam afetadas por incêndios. Essas áreas frequentemente desempenham papel fundamental como refúgio para espécies da fauna menos adaptadas ao fogo (Zorzetto, 2021).

Além disso, o aquecimento do bioma, que pode alcançar até de 2,5 a 4°C a mais durante a estação seca, interfere na formação do orvalho, que é uma fonte de umidade para o estrato herbáceo e para espécies com sistemas radiculares superficiais. A redução dessa umidade adicional intensifica o estresse hídrico das plantas, aumentando sua suscetibilidade à ignição e dificultando os processos de recuperação pós-fogo (Hofmann et al., 2021).

2.4.5 Incêndios em Unidades de Conservação

O processo de criação de áreas protegidas e de consolidação das políticas de conservação da natureza ocorreu de forma gradual, associado a uma transformação na mentalidade social e à crescente valorização do ambiente natural (Evenden, 1968; Franco et al., 2015).

Os Estados Unidos são frequentemente apontados como o marco inicial desse movimento, com a criação do Parque Nacional de Yellowstone, em 1872. Esse processo foi fortemente influenciado pelo transcendentalismo romântico, corrente filosófica e cultural que passou a conceber a natureza selvagem (*wilderness*) como um espaço sagrado, dotado de valor intrínseco e fundamental para o bem-estar humano, em oposição à percepção anterior da natureza como um obstáculo a ser conquistado (Franco et al., 2015).

No Brasil, o movimento conservacionista teve como pioneiro André Rebouças (1833–1898), que se inspirou na criação do parque Yellowstone para defender a criação de parques nacionais. Suas ideias anteciparam debates que somente décadas mais tarde seriam incorporados às políticas públicas de conservação no país. O Código Florestal de 1934 constitui o primeiro marco legal brasileiro a prever formalmente a criação de parques nacionais. A partir desse arcabouço legal, foi criado, em 1937, o Parque Nacional de Itatiaia, o primeiro do país. Posteriormente, em 1939, foram instituídos os Parques Nacionais da Serra dos Órgãos e de Sete Quedas (Rylands e Brandon, 2005).

Em 1948 cria-se a União Internacional para a Proteção da Natureza, posteriormente denominada de *International Union for Conservation of Nature (IUCN)*, atualmente essa é a maior organização internacional de conservação do mundo, e define as áreas protegidas como “um espaço geográfico claramente definido, reconhecido, dedicado e gerido através de meios legais ou outros mais eficazes, para alcançar a conservação a longo prazo da natureza (Dudley e Stolton, 2008).

O IUCN tende a propor uma estruturação das áreas protegidas por meio de um sistema (Felix e Fontgalland, 2021). Especificamente no Brasil, a Lei nº9.985/2000 instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) que tem como objetivo integrar a conservação com o uso sustentável dos recursos naturais, buscando um equilíbrio entre a proteção ambiental e o desenvolvimento econômico (SNUC, 2004).

Ao discutir os incêndios florestais em Unidades de Conservação (UCs), Bontempo et al., (2011) argumentam que esses eventos configuram uma ameaça significativa à integridade dessas áreas, sobretudo em razão da dificuldade de garantir sua proteção de forma eficaz. Tal limitação decorre, principalmente, da escassez de informações confiáveis que permitam compreender o comportamento do fogo em função das características específicas da vegetação e da dinâmica ambiental de cada unidade.

Segundo Ramalho et al., (2024) a ocorrência de incêndio serve de subsídio para análise do comportamento do fogo, outras técnicas auxiliaadoras é o uso de técnicas de sensoriamento remoto (Borges et al., 2021), ou, coleta de informações junto a moradores locais e análise dos dados fornecidos pelos Registros de Ocorrência de Incêndios Florestais (ROIs) (Bontempo et al., 2011).

2.4.6 Manejo Integrado do Fogo

Como mencionado, o fogo desempenha papel fundamental na composição e distribuição dos ecossistemas (Bond et al., 2005). Nos chamados ecossistemas dependentes do fogo, conforme definidos por Hardesty et al. (2005), o manejo com o uso do fogo tem sido incorporado ao longo de décadas, inclusive em áreas protegidas.

A título de exemplo, destaca-se a prática de queimas controladas em regiões como os Estados Unidos (El Asmar et al., 2024), na Austrália (Russell-Smith et al., 2021) e determinadas áreas da África do Sul (GEF, UNDP, FAO & Department of Environment Affairs, 2016).

Conforme descrito no Plano de Manejo do PNSC, historicamente predominou uma tendência de exclusão do fogo nas Unidades de Conservação, com exceção da implementação de aceiros negros, geralmente realizados no início da estação seca, no entorno e, em alguns casos, no interior das unidades. Adicionalmente, outro fator crítico relacionava-se aos moradores próximos ao parque, que, mesmo diante de restrições legais, continuavam a utilizar o fogo como prática de manejo (ICMBio/MMA, 2022).

A supressão do fogo por longos períodos pode resultar em mudanças vegetacionais significativas (Hoffmann et al., 2003). Segundo Batista et al. (2021), no Cerrado a supressão do fogo tem como consequência o adensamento de espécies arbóreas em áreas de savana e campos nativos, alterando a dinâmica ecológica desses ambientes.

Existe uma diferença entre a exclusão do fogo, que pode promover a regeneração florestal, e a expansão florestal induzida. A presença de dossel fechado, resultado da supressão do fogo reduz drasticamente a entrada de luz, limitando o crescimento de espécies adaptadas a ambientes abertos (Veldman et al., 2015).

No Cerrado, marcado por duas estações bem definidas, a seca promove um acúmulo substancial de biomassa durante o verão chuvoso. Essa biomassa torna-se altamente inflamável na estação seca, criando condições propícias à ocorrência de incêndios de difícil controle (Batista et al., 2021).

Ademais, a proibição do uso do fogo em propriedades rurais tende a gerar conflitos entre os proprietários de terras e as agências ambientais do governo, criando uma tensão que pode levar a ocorrência de incêndios criminosos (Batista et al., 2021; ICMBio/MMA, 2022).

O Parque Nacional da Chapada das Mesas (PNCM) no Maranhão, o Parque Estadual do Jalapão (PEJ) e a Estação Ecológica Serra Geral do Tocantins (EESGT) foram as pioneiras na implementação do Manejo Integrado do Fogo (MIF), em 2014 (Schmidt et al., 2016a).

O manejo era realizado no início da estação seca, como estratégia de mudar o atual regime do fogo, que era formado por incêndios frequentes e de grande extensão no final da estação seca (Schmidt et al., 2016).

A decisão política sobre o uso ou exclusão do fogo se relaciona com diferentes percepções sobre ele. Segundo Laris e Wardell (2006), o fogo pode ser interpretado sob três perspectivas distintas: como um “mal”, um “mal necessário” ou uma “necessidade”.

O “mal” uso frequentemente relaciona-se com a ideia de que o uso tradicional do fogo é uma prática arcaica, trazendo a ideia de que o elemento altera a paisagem de maneira negativa, o uso como “mal necessário”, associa-se a circunstâncias específicas ou controladas, geralmente no início da estação seca e regulamentado por licenças (Berlinck e Lima, 2021). A percepção do fogo como necessidade reconhece o fogo como um componente ecológico e cultural para manutenção das savanas, visão que ultrapassa a ideia do fogo apenas como ferramenta para evitar incêndios florestais (Berlinck e Batista, 2020; Berlinck e Lima, 2021).

A história do MIF no Brasil, inicia-se em 2009, as negociações sobre o uso do fogo era para determinadas práticas tradicionais, como agricultura e o pastoreio, na EESGT, regulamentadas por meio de Termo de Compromisso (TC) (Schmidt et al., 2016b). O acordo foi regularizado em 2012, pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) que autorizou as práticas de queimas prescritas por comunidades quilombolas em uma UC de proteção integral. No entanto, esse episódio apresentou limitações, uma vez que as dimensões sociais e culturais não foram consideradas (Berlinck e Lima, 2021; Schmidt et al., 2016b).

Essa experiência despertou atenção nacional para o uso do fogo como ferramenta de manejo em UC. Em 2013, a EESGT sediou o 1º Seminário Internacional de Manejo Integrado do Fogo (MIF), evento que resultou no estabelecimento de uma parceria entre o Brasil e a Alemanha, com o Projeto Cerrado–Jalapão. A partir desse marco, as discussões sobre o Manejo Integrado do Fogo ganharam maior projeção e relevância no país (Berlinck & Lima, 2021).

Esse processo foi de grande importância para o intercâmbio de experiências, para o fortalecimento de projetos de cooperação internacional, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada do comportamento do fogo e de suas implicações ecológicas por parte dos gestores brasileiros. (Berlinck & Lima, 2021).

Em 2014, os gestores da EESGT passaram por uma experiência técnica na Austrália, os possibilitando de publicar o primeiro Plano de Manejo Integrado do Fogo (ICMBio/MIF), no ano seguinte, implementaram a tríade “manejo, cultura e ecologia do fogo”, esse foram os marcos de institucionalização e aprimoramento desse tipo de manejo (Barradas e Ribeiro, 2021).

Em 2019, o Brasil recebeu a sétima edição da *International Wildland Fire Conference* (ILC), o qual o tema central foi: “*Frente a frente com o fogo em um mundo em mudanças: redução da vulnerabilidade das populações e dos ecossistemas por meio do Manejo Integrado do Fogo*”. Como resultado do evento foi publicado na revista científica *Biodiversidade Brasileira*, Nº Especial, 7ª Conferência Internacional sobre Incêndios Florestais, Resumos, Ano 9, Nº 1 (2019).

Atualmente o MIF encontra-se regulamentado pela Lei Federal nº 14.944 de 2024.

O MIF no Brasil possui uma Coordenação de Manejo Integrado do Fogo (CMIF), Comitê de Assessoramento Técnico do MIF (COMIF), os quais são instituições do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Cada UC elabora o seu Plano de Manejo Integrado do Fogo (PMIF), fundamentado no Roteiro desenvolvido pelos analistas do ICMBio. Os PMIF são ferramentas para gestão de fogo nas UCs, a médio e longo prazo, direcionando os planejamentos, monitoramentos e as avaliações anuais (ICMBio, MMA, 2022).

Além do PMIF, existem outros instrumentos complementares de planejamento e gestão. Destaca-se o Plano Operativo Anual (POA), voltado às ações de prevenção e combate aos incêndios florestais. Trata-se de um documento tático-operacional, que reúne informações prévias sobre as atividades a serem executadas ao longo do ano, considerando as especificidades técnicas, as condições orçamentárias e o escalonamento de prioridades definido para o período de referência. E por fim, o Relatório Anual constitui um instrumento de avaliação e monitoramento, destinado a verificar o cumprimento das metas e objetivos estabelecidos no PMIF, permitindo a análise dos resultados alcançados e o aperfeiçoamento contínuo das estratégias de manejo do fogo (ICMBio/MMA, 2022).

Para elaboração do Roteiro de Planejamento do PMIF, o ICMBio considera conceitos semelhantes aos apresentados na Seção 2.3.4. Além disso, é utilizado a legislação específica do território, e é necessário realizar a contextualização e a análise situacional, essas informações podem ser encontradas em ICMBio (2022).

Por conseguinte, é fundamental considerar os recursos e valores fundamentais da UC, avaliando o grau de tolerância, dependência ou sensibilidade à passagem do fogo. Essa análise deve ser subsidiada por informações geográficas, especialmente aquelas derivadas do zoneamento da área. Para a definição da realização de queimas controladas, é indispensável a integração de dados de sensoriamento remoto, como imagens de satélite, com vistorias técnicas em campo, destinadas à avaliação *in loco* das condições da vegetação, do material combustível e dos aspectos operacionais (ICMBio/MMA, 2022).

2.5 METODOLOGIAS PARA MODELAGEM

O ambiente permite ser estudo por meio de modelos, a partir de inter-relações entre os elementos sociais e naturais, por meio de uma perspectiva abstrata que permite captar a dinâmica de fluxo de energia e matéria (Christofolletti, 1999).

Com as mudanças climáticas, a necessidade de prever cenários futuros provocou o desenvolvimento de vários modelos de previsão, inclusive os incêndios (Das et al., 2023). Os modelos concentram-se em padrões espaço-temporais que relacionam-se com diferentes componentes, como topografia, clima, biofísica e perturbações com a ignição de incêndios florestais (Boubeta et al., 2015).

Os mapas de risco de incêndios são feitos com base em informações geográficas da área de análise, combinadas com ferramentas e métodos avançados (Zhao et al., 2021). A partir do desenvolvimento do processamento computacional, aconteceram avanços nos estudos de modelagem ambientais e de risco, que são capazes de encontrar uma estrutura de rede ideal em um sistema de previsão (Lopes, 2019).

Dentro da modelagem matemática, os modelos podem ser classificados de diversas formas, dependendo da sua estrutura, natureza do fenômeno, podendo ser modelos determinísticos, onde os resultados são previsões específicas ou reprodutíveis. Modelos Probabilísticos, Modelos de Compartimentos, que tratam o ambiente como uma série de unidades conectadas, entre outros (Crawford-Brown, 2001).

Outra metodologia é por meio de Machine Learning (ML), que permite capturar relações complexas e não lineares em grandes volumes (Rahaman et al., 2025). Enquanto os modelos clássicos explicam o fenômeno por meio das leis fundamentais, por meio de equações diferenciais, o ML foca no reconhecimento de padrões e na previsão de comportamento a partir de dados históricos (Crawford-Brown, 2001; Rahaman et al., 2025).

Alguns estudos como o de Fernandes (2018) e Lopes, (2019) realizaram uma revisão e comparação entre alguns métodos, dentre elas: Análise Multicritério (*Analytic Hierarchy Process – AHP*), Lógica Fuzzy, Redes Neurais Artificiais (RNA).

O processo de hierarquia analítica foi desenvolvida por Saaty (1970), trata-se de uma abordagem que divide-se em três etapas: decomposição, avaliação e síntese (Schmold et al., 2001). Esse método estabelece uma hierarquia de decisão, classificando os elementos de um nível mais alto para o mais baixo (decomposição), em seguida, constroi a matriz de comparação para a definição dos pesos atribuídos a cada variável (avaliação), para validação (síntese) da matriz, calcula-se a Relação de Consistência (RC) (Fernandes et al., 2018).

A Lógica Fuzzy, elaborada por Zadeh (1965), é um modelo matemático baseado na noção de que os fenômenos do mundo real não são, em sua maioria, formados por limites rígidos. Diferentemente da lógica clássica, em que a associação de um elemento a um conjunto é binária (pertence ou não pertence), na Lógica Fuzzy a pertinência é expressa por valores dentro do intervalo $[0,1]$, sendo 0 a completa não pertinência, 1 a total pertinência e os valores intermediários representando graus parciais de associação (Marro et al., 2010).

As Redes Neurais Artificiais, trata-se de um modelo de Machine Learning, desenvolvido por Haykin (2001), onde parte do princípio de que o cérebro é um computador (sistema de processamento de informação) altamente complexo, não-linear e paralelo. A organização de seus constituintes estruturais, nomeados de neurônios, realizam o processamento (Haykin, 2001).

Além dessas metodologias, existe uma grande diversidade de modelos disponíveis. A modelagem tem sido uma ferramenta essencial para extrapolação espacial de resultados, permitindo a caracterização de cenários futuros (Fonseca, 2024).

No campo da Geografia Física, a modelagem atua como instrumento analítico para previsão de comportamento em diferentes escalas, sendo uma etapa no processo de investigação (Fernandes, 2016). Os modelos devem ser encarados como construções dinâmicas, passíveis de revisões e aprimoramentos contínuos, a partir do desenvolvimento científico, novas técnicas são incorporadas e hipóteses reformuladas (Fonseca, 2024).

CAPÍTULO III



3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

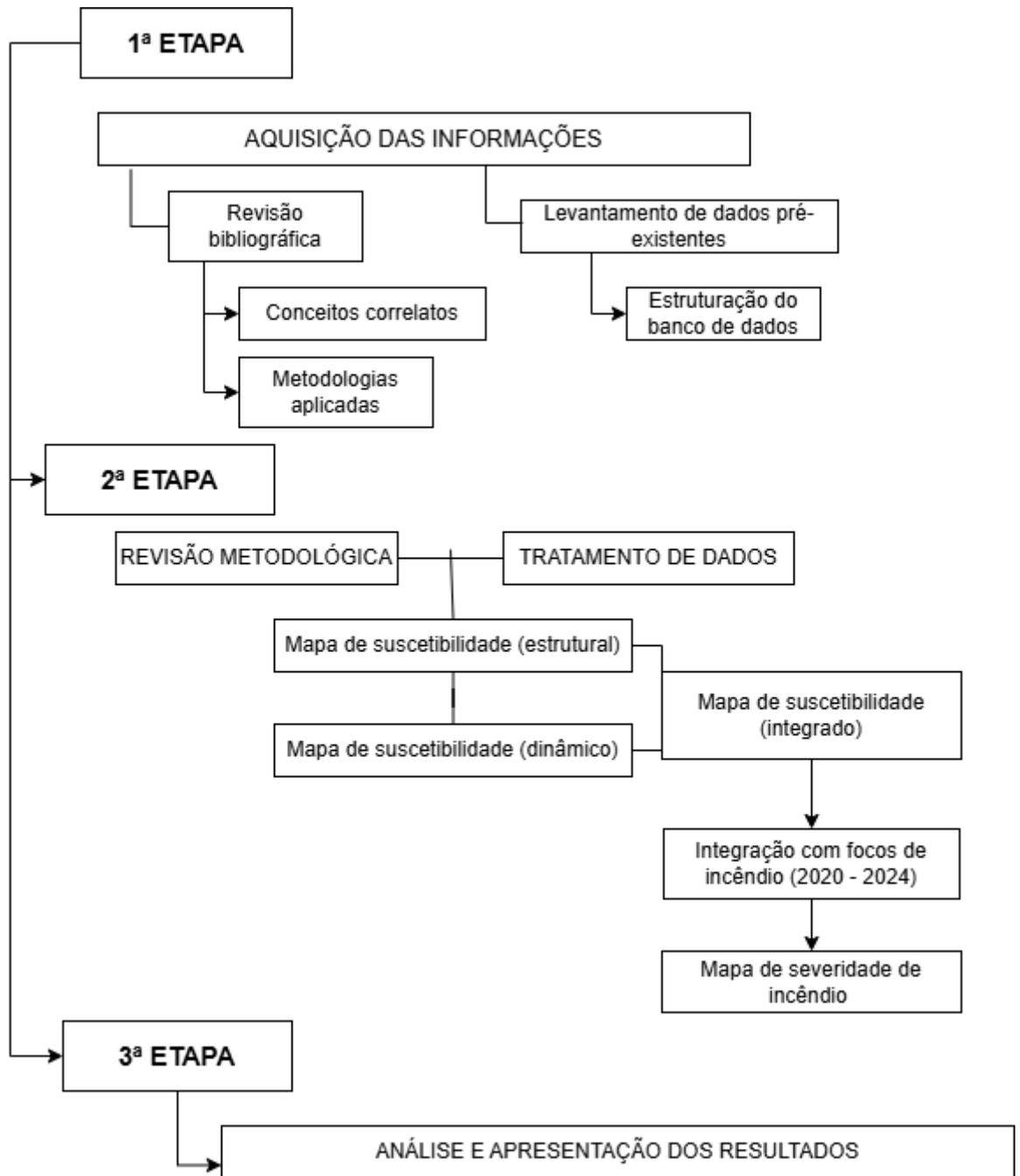
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Para mapear a suscetibilidade a incêndios florestais, é necessário empregar métodos, modelos e fatores capazes de explicar as relações que condicionam a deflagração e propagação do fogo (Chicas and Østergaard Nielsen, 2022). Freire (2002) e Caetano et al., (2004) propõe uma classificação dos fatores determinantes em duas categorias: os associados ao risco estrutural, constituídos por características relativamente estáveis no tempo; e aqueles relacionados ao risco dinâmico, cuja variação ocorre em escalas temporais mais curtas.

Empregando a análise de Multicritério, especificamente o Processo Analítico Hierárquico (*Analytical Hierarchy Process* - AHP), baseando-se no método utilizados por Prudente (2016) foi construídas as tabelas 1, 2 e 3. Sucedeu pela reclassificação dos fatores que condicionam a suscetibilidade do ambiente ao fogo, onde cada fator recebeu uma nota entre 1 a 5, onde 1 refere-se a muito baixo, 2 baixo, 3 a moderada, 4 a alta e 5 a muito alta.

Embora a área de estudo esteja majoritariamente inserida no bioma Cerrado, cuja fisionomia é caracterizada por um gradiente que varia de campo limpo a cerradão, não se tratando, portanto, de um bioma estritamente florestal (Coutinho, 2006), optou-se pela utilização do termo incêndio florestal. Essa escolha fundamenta-se no trabalho de Bento-Gonçalves et al. (2012), que discute diferentes conceituações adotadas internacionalmente. Nesse contexto, destaca-se a definição empregada nos Estados Unidos pela *National Wildfire Coordinating Group* (2011), que considera incêndio florestal qualquer incêndio ocorrido em áreas silvestres, e a definição adotada na Austrália pelo *Australasian Fire Authorities Council* (2010), segundo a qual incêndio florestal corresponde a qualquer incêndio em áreas com cobertura vegetal, incluindo pastagens, florestas e matas fechadas, sendo excluídos apenas os incêndios de caráter planejado. A Figura 2 apresenta o fluxograma para as etapas de desenvolvimento do trabalho.

Figura 2 - Fluxograma estrutural da dissertação



Inicialmente, realizou-se a aquisição das informações, contemplando a revisão bibliográfica, o levantamento cartográfico e a coleta de dados pré-existentes, com vistas à estruturação do banco de dados. Em seguida, os procedimentos metodológicos foram organizados em etapas, nas quais essas informações subsidiaram a elaboração dos mapas de risco estrutural, dinâmico e integrado.

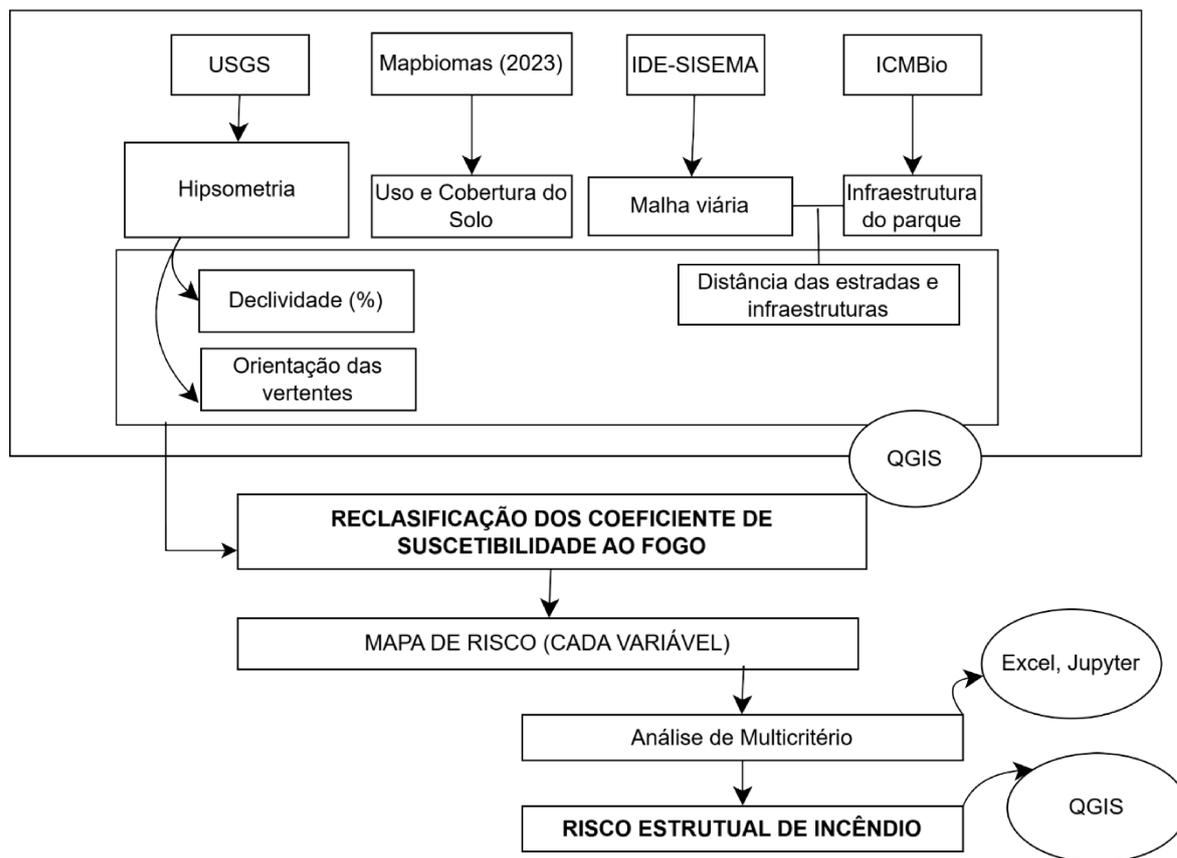
Posteriormente, os resultados obtidos foram comparados com os registros de focos de incêndio disponibilizados pela plataforma do FIRMS/NASA referentes ao período de 2020 a 2024.

A partir da análise dos focos de calor, em conjunto com as cicatrizes de queimadas disponibilizadas pelo INPE, foi selecionada uma data para a quantificação da severidade do fogo. Para esse procedimento, aplicou-se o índice *differenced Normalized Burn Ratio* (dNBR). Por fim, realizou-se a análise integrada e comparativa de todos os resultados obtidos.

3.1.2 Risco Estrutural de Incêndio Florestal

Para a elaboração do mapa de risco estrutural, foram considerados os seguintes fatores associados ao potencial de ignição: declividade (%), altitude (m), orientação das vertentes, distância da rodovia (m) e uso e ocupação do solo (Caetano et al., 2004). Na Figura 3 é apresentado o fluxograma para elaboração do mapa de risco estrutural.

Figura 3 - Fluxograma com as etapas da elaboração do risco estrutural de incêndio



Os mapas de declividade, altitude, orientação das vertentes e distância de corpos d'água foram derivados do Modelo Digital de Elevação (MDE) proveniente da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 metros, disponibilizado pelo *United States Geological Survey* (USGS). A partir da aquisição das imagens, foram aplicadas técnicas de geoprocessamento no software QGIS para a construção da base de dados. Em

seguida, procedeu-se à reclassificação dos fatores, considerando-se a sua suscetibilidade à ocorrência de fogo. Essa etapa foi fundamentada em referências da literatura científica relativas a áreas com características semelhantes à área de estudo, as quais estão devidamente apresentadas nas tabelas abaixo.

Para a classificação da declividade, foi consultado Koproski et al., (2011) e Souza, (2022). De acordo com a literatura especializada, áreas com maior inclinação tendem a apresentar maior suscetibilidade à propagação do fogo, uma vez que o aclive favorece o processo de transferência de calor e, conseqüentemente, a velocidade de avanço das chamas (Koproski et al., 2011).

A classificação da altitude foi estabelecida com base nos critérios propostos por Junior et al., (2020), considerando que as temperaturas tendem a ser mais altas em altitudes mais baixas. Para orientação das vertentes, foi consultado Koproski et al., (2011) que indica que as faces orientadas para o Norte exibem uma probabilidade superior de ocorrência e propagação de incêndios florestais. Devido a posição geográfica no Hemisfério Sul, onde a irradiação solar é recebida de maneira mais direta e intensa nessas faces ao longo de grande parte do ano (Souza, 2022).

Para a elaboração do mapa de distância das rodovias, utilizou-se o shapefile disponibilizado pelo IDE-SISEMA, correspondente à base rodoviária do estado de Minas Gerais. Inicialmente, o arquivo vetorial foi recortado para o limite da área de estudo e posteriormente convertido para o formato raster. Em seguida, aplicou-se a ferramenta *Proximity* para gerar o mapa de distância. Os dados de infraestruturas foram extraídos do zoneamento realizado no PNSC e disponibilizado pelo ICMBio.

A classificação dos valores resultantes foi fundamentada em Souza, (2022), que aponta que os incêndios de maior magnitude tendem a ocorrer em áreas próximas a rodovias e estradas principais, devido ao aumento do potencial de ignição associada à presença e circulação humana.

Por fim, o mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado a partir da base de dados do MapBiomias (2023), que emprega especialistas em sensoriamento remoto e algoritmos de inteligência artificial para processar imagens da série Landsat, com resolução espacial de 30 metros. Para a área de estudo, foram identificadas as seguintes classes: Afloramento Rochoso, Formação Florestal, Formação Savânica, Campo Alagado, Formação Campestre, Pastagens e Outras Áreas Não Vegetadas.

A reclassificação dessas categorias seguiu os critérios propostos por Lacerda et al., (2022); e Prudente (2016), que analisaram o risco de incêndios em áreas de Cerrado, permitindo a atribuição de níveis de suscetibilidade compatíveis.

Após a geração e reclassificação da base de dados, elaborou-se a matriz de comparação necessária para a construção do mapa de risco estrutural de incêndios florestais. Essa matriz foi desenvolvida com base no Processo Analítico Hierárquico (AHP), metodologia proposta por Saaty (1997). A partir da estruturação hierárquica e da comparação par a par entre os fatores, foi possível estabelecer os pesos relativos de cada variável, conforme seu grau de influência no risco. As avaliações seguiram a escala fundamental de Saaty (1997) (Tabela 2), que orienta a atribuição de valores numéricos para expressar a importância relativa entre os critérios analisados.

Tabela 2 - Escala de comparação entre os respectivos pesos

VALOR	DEFINIÇÃO
1	Elementos iguais
3 ou 1/3	Fraca importância de um elemento sobre outro
5 ou 1/5	Importância forte de um elemento sobre outro
7 ou 1/7	Importância muito forte de um elemento sobre outro
9 ou 1/9	Importância extrema de um elemento sobre outro
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários entre dois julgamentos

Fonte: adaptado de Saaty(1977)

O resultado desse procedimento é uma matriz quadrada composta por valores recíprocos, na qual a diagonal principal é formada por valores unitários, correspondentes à comparação de cada fator consigo mesmo. Os demais elementos da matriz representam as comparações mútuas entre os critérios. Após a construção da matriz, procede-se ao cálculo dos pesos relativos por meio da normalização: cada valor da matriz é dividido pela soma de sua respectiva coluna. Em seguida, obtêm-se os pesos finais ao calcular a média dos valores de cada linha, isto é, a soma dos valores normalizados da linha dividida pela ordem da matriz. Esse processo permite determinar o peso relativo de cada fator dentro da estrutura hierárquica (Rezende et al., 2017).

Para verificar a consistência da matriz de comparação, são calculados o Índice de Consistência (IC) e a Razão de Consistência (RC). O IC expressa o grau de coerência interna dos julgamentos realizados, estimando a relação entre os pesos estatísticos resultantes do AHP. A verificação é realizada a partir do valor de λ_{max} , obtido durante o processamento da matriz. O cálculo do IC é apresentado na Fórmula 1.

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

* IC = somatória dos pesos / pesos dos critérios;

* n = ordem da matriz;

* λ_{max} = somatória (vetor de consistência) / n

A Razão de Consistência (RC) é definida pelo índice Randômico (IR), extraído da tabela de valores para matriz quadrada de ordem n estabelecida pelo Oak Ridge National Laboratory, EUA. Para esse trabalho, utilizamos uma matriz de ordem 5, onde o valor do IR é de 1,12.

Tabela 3 - Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n

Nº de variáveis	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fonte: adaptada de Saaty (1980)

Com os valores de IC e IR definidos, calcula-se o valor da RC, é necessário que seja inferior a 0,10 (10%) para que haja consistência dos dados. O cálculo é obtido pela Fórmula 2 (Rezende et al., 2017).

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (2)$$

O referencial bibliográfico desempenha papel fundamental na comparação e na definição das prioridades estabelecidas no processo analítico hierárquico. O fator Uso e Cobertura da Terra foi considerado o de maior importância, uma vez que as diferentes fisionomias do Cerrado, especialmente as formações savânicas, representam o principal material combustível. Segundo Lacerda et al. (2022), o uso e a cobertura da terra estão diretamente relacionados à disponibilidade de combustível, sendo este um elemento essencial para a ocorrência de incêndios.

Em seguida, a proximidade de estradas e infraestruturas recebeu o segundo maior peso, em razão da forte influência do fator antrópico. Áreas próximas a rodovias e acessos apresentam maior suscetibilidade à ocorrência de incêndios, em função do aumento das fontes de ignição associadas às atividades humanas (Prudente, 2016).

A declividade foi considerada o terceiro fator em ordem de importância, uma vez que, conforme apontado pela literatura, terrenos mais inclinados favorecem a transferência de calor e aceleram a propagação das chamas (Prudente, 2016; Tetto et al., 2022, p. 22).

A orientação das vertentes apresenta influência moderada, por interferir nos padrões de insolação. Vertentes voltadas para o norte tendem a receber maior incidência de radiação solar, o que contribui para condições mais secas e, conseqüentemente, maior suscetibilidade ao fogo (Sousa, 2022).

Por fim, a altitude foi considerada o fator de menor importância, uma vez que sua influência sobre a umidade do ar ocorre de forma indireta e, em determinadas regiões, pode apresentar baixa significância na dinâmica dos incêndios florestais (Prudente, 2016).

A tabela 4 apresenta os fatores selecionados, o peso determinado pela matriz de comparação, as classes e as notas baseadas na literatura.

Tabela 4 - Peso para as variáveis estruturais aplicadas na pesquisa, suas classes, risco de fogo e referências.

Variável	Peso	Classes	Notas	Referências
Uso e Ocupação do solo	0,50	Afloramento Rochoso	1	Prudente, (2016)
		Formação Florestal	4	
		Formação Savânica	5	
		Campo Alagado	1	
		Formação Campestre	5	
		Pastagem	3	
		Outras áreas não vegetadas	3	
Distância da Rodovia (m)	0,23	<150 m	5	Souza, (2022)
		151 a 300 m	4	
		300 a 450 m	3	
		450 a 600 m	2	
		>600 m	1	
Declividade (%)	0,13	<10%	1	Koproski et al., (2011); Souza, (2022)
		10,01 a 20%	2	
		20,01 a 30%	3	
		30,01 a 50%	4	
		>50%	5	
Orientação das Vertentes	0,082	Sudeste/Sul/Sudoeste	1	Koproski et al.,(2011)
		Leste	2	
		Nordeste	3	
		Noroeste/Oeste	4	
		Norte	5	
Altitude (m)	0,037	600 - 900	5	Junior et al., (2020)
		900 - 1200	3	
		1200 - 1400	2	
		>1400	1	

Org: Santos (2025)

Neste estudo, obteve-se IC = 0,085 e IR = 1,12, resultando em um CR = 0,076, o que indica que a matriz apresenta consistência aceitável dentro dos limites estabelecidos pelo método AHP.

A Figura 4 apresenta a matriz elaborada, organizada de acordo com a sequência dos componentes apresentada na Tabela.

Figura 4 - Matriz estruturada para o risco estrutural

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 4 & 5 & 6 & 8 \\ 1/4 & 1 & 3 & 4 & 6 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 3 & 5 \\ 1/6 & 1/4 & 1/3 & 1 & 4 \\ 1/8 & 1/6 & 1/5 & 1/4 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Matriz de Comparação}} \rightarrow \underbrace{\begin{pmatrix} 0.574 & 0.696 & 0.524 & 0.421 & 0.333 \\ 0.144 & 0.174 & 0.315 & 0.281 & 0.250 \\ 0.115 & 0.058 & 0.105 & 0.211 & 0.208 \\ 0.096 & 0.043 & 0.035 & 0.070 & 0.167 \\ 0.072 & 0.029 & 0.021 & 0.018 & 0.042 \end{pmatrix}}_{\text{Matrix Normalizada}} \rightarrow \underbrace{\begin{pmatrix} 0.509 \\ 0.233 \\ 0.139 \\ 0.082 \\ 0.037 \end{pmatrix}}_{\text{Vector Peso (w)}}$$

Org: Santos (2025)

As classes de cada critério são multiplicadas pelos coeficientes de ponderação, e em seguida seus resultados são somados (Durlević et al., 2021). Esse cálculo é representado pela equação 3. Além disso, esse procedimento é repetido para o risco dinâmico e para o risco integrado.

$$RE = (USO * 0,5) + (ROD * 0,23) + (DEC * 0,13) + (ORI * 0,082) + (ALT * 0,037) \quad (3)$$

*RE = Risco Estrutural;

*USO = Uso e Ocupação do Solo;

*ROD = Distância da rodovia;

*DEC = Declividade;

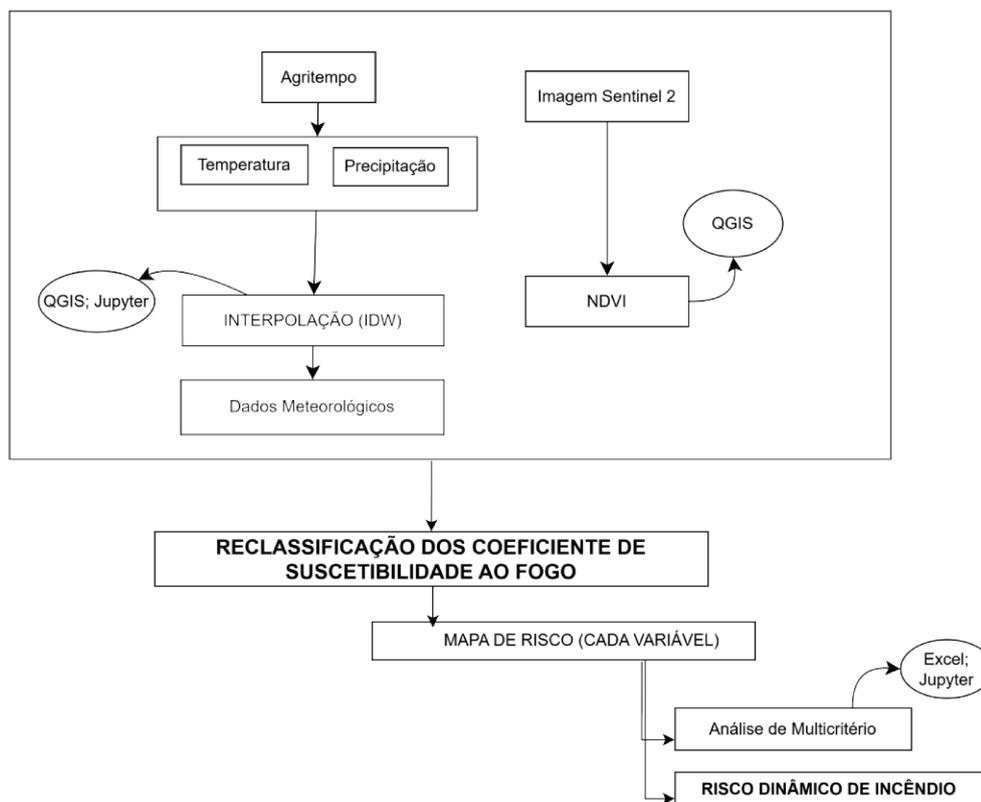
*ORI = Orientação das vertentes;

*ALT = Altitude.

3.1.3 Risco Dinâmico de Incêndio Florestal.

O mapa de risco dinâmico trabalha com as variações das condições de inflamabilidade, a partir das variáveis meteorológicas (Felgueiras, 2005). Para este trabalho foram utilizados os seguintes fatores: Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI), que possibilita avaliar as condições da vegetação em períodos mais ou menos favoráveis à ocorrência de incêndios (Oliveira, 2019); a precipitação, diretamente relacionada ao teor de umidade do material combustível e, portanto, à sua inflamabilidade (Souza, 2022); a temperatura do ar que intensifica o risco de ignição e propagação do fogo (Oliveira, 2019). A Figura 5 apresenta o fluxograma para elaboração do risco dinâmico.

Figura 5 - Fluxograma com as etapas da elaboração do risco dinâmico de incêndio



Os dados meteorológicos de temperatura e precipitação foram obtidos a partir do sistema de monitoramento agrometeorológico da Embrapa e do Cepagri/Unicamp (Embrapa, 2015). As informações foram coletadas nas estações meteorológicas de Delfinópolis, Passos, São João Batista do Glória, Piumhi, Vargem Bonita e São Roque de Minas, considerando uma série temporal compreendida entre os anos de 2020 e 2024. Essas estações foram escolhidas por sua maior proximidade em relação à área de estudo e pela disponibilidade de séries temporais completas.

Para a interpolação dos dados, foi aplicado o método *Inverse Distance Weighted* (IDW), no qual o valor atribuído a cada célula interpolada resulta de uma média ponderada dos pontos amostrais mais próximos, sendo os pesos definidos pelo inverso da distância elevado a um expoente (²). Trata-se de uma das técnicas mais utilizadas para a interpolação de dados pontuais distribuídos espacialmente, especialmente em contextos com número limitado de estações de medição (Silva et al., 2013).

O NDVI foi calculado de acordo com a Equação (4), apresentando valores que variam entre 0 e 1, em que valores mais elevados indicam maior densidade e vigor da cobertura vegetal (Ji et al., 2024). As imagens utilizadas são do sensor Sentinel-2, L2A, que já possui correções atmosféricas aplicadas.

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED) \quad (4)$$

Aplicou-se a mesma metodologia empregada para a avaliação dos riscos estruturais. Nesse contexto, o NDVI recebe o maior peso, por ser um indicador da quantidade de biomassa e o seu estado de secura (senescência) (Prudente, 2016). Em seguida, destacou-se a precipitação, que influencia diretamente a umidade do solo e da vegetação, períodos com chuva abaixo de 25 mm são grandes gatilhos para o aumento da suscetibilidade (Sousa, 2022).

A influência da temperatura se dá pois quanto mais quente estiver o ambiente, menos calor adicional é necessário para que o material combustível atinja seu ponto de ignição (Prudente, 2016)

Os fatores selecionados, o peso determinado pela matriz de comparação, as classes e as notas estão na tabela 5.

Tabela 5 - Peso para as variáveis dinâmicas aplicadas na pesquisa, suas classes, risco de fogo e referências.

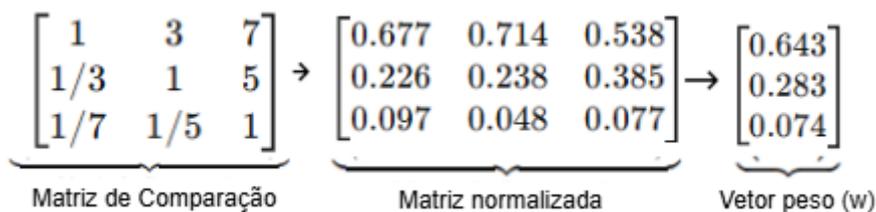
Variável	Peso	Classe	Notas	Referências
NDVI	0,64	-1 a 0	1	Prudente, (2016)
		0 a 0,25	3	
		0,25 a 0,5	2	
		0,5 a 1	1	
Precipitação (mm)	0,28	0 - 50 mm	5	Dias, (2023); Júnior, (2002)
		50 -100 mm	4	
		100 - 150 mm	3	
		150 - 200 mm	2	
		>200 mm	1	
Temperatura (°C)	0,074	entre 19 e 20°C	2	Ladislau et al., (2021)
		entre 20 e 21°C	3	
		entre 21 e 23°C	4	
		acima de 23°C	5	

Org: Santos (2025)

Obteve-se IC = 0,03 e IR = 0,58, resultando em um CR = 0,052, o que indica que a matriz apresenta consistência aceitável dentro dos limites estabelecidos pelo método AHP.

A Figura 6 apresenta a matriz montada e organizada de acordo com os fatores da Tabela 4.

Figura 6 - Matriz elaborada com os componentes do risco dinâmico



Org: Santos (2025)

A equação 5 representa o cálculo usado para elaboração do mapa de risco de incêndio dinâmico da Serra da Canastra.

$$RD = (NDVI * 0.64) + (PREC * 0.28) + (TEMP * 0.074) \quad (5)$$

*RE = Risco Dinâmico

*TEMP = Temperatura;

*PREC = Precipitação;

*UMI = Umidade relativa;

*NDVI = índice de vegetação por Diferença Normalizada.

3.1.4 Risco Integrado de Incêndio Florestal

A partir dos mapas de risco estrutural e dinâmico, é feita a integração com o objetivo de gerar um mapa que leva em consideração todos esses fatores.

A integração dos fatores é realizada por meio da Combinação Linear Ponderada (CLP), um dos métodos mais amplamente utilizados em análises baseadas no AHP. Nesse procedimento, cada mapa temático é multiplicado pelo peso atribuído ao seu respectivo fator, em nível de pixel, e os resultados são posteriormente somados para gerar o mapa final de risco (Sartori et al., 2012).

Os pesos atribuídos aos mapas são relativos entre si. O mapa de risco dinâmico recebeu o maior peso por conter fatores que detectam alterações nas condições de inflamabilidade (Prudente, 2016b).

Com isso estabelecido, emprega-se a mesma metodologia. Os resultados indicam o IC de 0, o RI, com base no índice randômico é de 1,49, dessa forma o CR é de 0, sendo uma matriz perfeitamente consistente.

A tabela 6 apresenta os pesos, classes e notas para o mapa de risco integrado.

Tabela 6 - Peso para o mapa de risco integrado aplicado na pesquisa, suas classes, risco de fogo e referências.

Variável	Peso	Classes	Notas	Referências
NDVI	0,384	-1 a 0	1	Prudente, (2016)
		0 a 0,25	3	
		0,25 a 0,5	2	
		0,5 a 1	1	
Precipitação (mm)	0,168	0 a 50 mm	5	Dias, (2023)
		50 a 100 mm	4	
		100 a 200 mm	3	
		200 a 300 mm	2	
		>300 mm	1	
Temperatura (°C)	0,044	entre 19 e 20°C	2	Ladislau et al., (2021)
		entre 20 e 21°C	3	
		entre 21 e 23°C	4	
		acima de 23°C	5	
Uso e Ocupação	0,2	Afloramento Rochoso	1	Prudente, (2016)

do solo		Formação Florestal	4	
		Formação Savânica	5	
		Campo Alagado	1	
		Formação Campestre	5	
		Pastagem	3	
		Outras áreas não vegetadas	3	
Distância da Rodovia (m)	0,092	<150 m	5	Souza, (2022)
		151 a 300 m	4	
		300 a 450 m	3	
		450 a 600 m	2	
		>600 m	1	
Declividade (%)	0,052	<10%	1	Koproski et al., (2011); Souza, (2022)
		10,01 a 20%	2	
		20,01 a 30%	3	
		30,01 a 50%	4	
		>50%	5	
Orientação das Vertentes	0,033	Sudeste/Sul/Sudoeste	1	Koproski et al.,(2011)
		Leste	2	
		Nordeste	3	
		Noroeste/Oeste	4	
		Norte	5	
Altitude (m)	0,015	600 – 900	5	Junior et al., (2020)
		900 - 1200	3	
		1200 - 1500	2	
		>1500	1	

Org: Santos (2025)

A Figura 7 apresenta a matriz montada e organizada de acordo com os fatores da Tabela 5.

Figura 7 - Matriz elaborada para o Risco Integrado

$$\begin{matrix}
 \begin{bmatrix}
 1 & 3 & 5 & 3 & 5 & 7 & 7 & 9 \\
 1/3 & 1 & 3 & 2 & 3 & 5 & 5 & 7 \\
 1/5 & 1/3 & 1 & 1/2 & 2 & 3 & 3 & 5 \\
 1/3 & 1/2 & 2 & 1 & 3 & 5 & 5 & 7 \\
 1/5 & 1/3 & 1/2 & 1/3 & 1 & 3 & 3 & 5 \\
 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1/5 & 1/3 & 1 & 2 & 3 \\
 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1/5 & 1/3 & 1/2 & 1 & 3 \\
 1/9 & 1/7 & 1/5 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1
 \end{bmatrix}
 & \rightarrow &
 \begin{bmatrix}
 0.384 \\
 0.168 \\
 0.044 \\
 0.200 \\
 0.092 \\
 0.052 \\
 0.033 \\
 0.015
 \end{bmatrix}
 \\
 \text{Matriz de Comparação} & & \text{Vetor peso (w)}
 \end{matrix}$$

Org: Santos (2025)

A produção cartográfica do mapa de risco integrado foi realizada a partir da Fórmula 5. Considerando que as variáveis dinâmicas apresentam elevada variabilidade em curtos intervalos de tempo, optou-se por gerar dois mapas distintos de risco integrado. O primeiro corresponde ao período chuvoso, compreendido entre outubro e março. O segundo refere-se ao período de estiagem, de abril a setembro (Tizianel and Junior, 2023).

$$RI = (NDVI * 0,384) + (PRE * 0,168) + (TEMP * 0.044) + (USO * 0,2) \\ + (ROD * 0,092) + (DEC * 0,052) + (ORI * 0,033) + (ALT * 0,015) \quad (5)$$

3.1.5 Severidade ao fogo

A severidade da queimada identifica o grau de perturbação ou alteração pelo incêndio, essas transformações podem ser identificadas por meio de índices espectrais que utilizam faixas espectrais que proporcionarão a maior distinção das alterações no ambiente (Silva et al., 2023). Por exemplo, o comprimento de onda do infravermelho próximo (NIR), é sensível ao teor de clorofila da vegetação viva, e o comprimento de onda do infravermelho de onda curta (SWIR), apresentam sensibilidade ao separar a madeira morta do solo, tornando possível identificar cinzas e madeiras carbonizadas em um ambiente (Miller e Thode, 2007; Pereira et al., 1999).

O Normalized Burn Ratio (NBR) (equação 6), utiliza as bandas do NIR e do SWIR para identificar as mudanças na quantidade de vegetação verde viva, teor de umidade e algumas condições do solo que podem ocorrer após o fogo (Miller e Thode, 2007). Dessa forma, o delta NBR (dNBR) (equação 7) torna-se um índice diferenciado na captura da complexidade espacial da severidade dentro dos perímetros do incêndio (Miller e Thode, 2007; Silva et al., 2023).

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (6)$$

$$dNBR = NBR_{préfogo} - NBR_{pósfogo} \quad (7)$$

Para a identificação dos dias de ocorrência das queimadas, foram utilizados os dados de focos de calor do FIRMS/NASA, os quais também subsidiaram a sobreposição dos registros de focos com as áreas de maior suscetibilidade ao fogo.

As imagens utilizadas foram do sensor Sentinel-2, nível de processamento L2A, as quais já apresentam correções *Top of Atmosphere* (TOA) e *Bottom of Atmosphere* (BOA). Esses dados foram obtidos por meio do *Copernicus Open Access Hub*, da Agência Espacial Europeia (*European Space Agency* – ESA).

As bandas espectrais utilizadas para o cálculo dos índices foram a B08, correspondente ao infravermelho próximo (*Near Infrared* – NIR), com comprimento de onda aproximado de 842 nm e resolução espacial de 10 m, e a B12, referente ao infravermelho de ondas curtas 2 (*Shortwave Infrared* – SWIR 2), com comprimento de onda de 2190 nm e resolução espacial de 20 m. Dessa forma, a banda B12 foi reamostrada para a resolução espacial de 10 m, utilizando o método do vizinho mais próximo, a fim de possibilitar o cálculo conjunto com as demais bandas de 10 m (Silva et al., 2023).

A definição das datas de análise foi realizada a partir da avaliação dos focos de calor utilizados na sobreposição com o mapa de risco integrado. Observou-se a concentração de focos nas proximidades da Serra das Sete Voltas, área que, conforme o mapeamento, apresenta alta suscetibilidade à ocorrência de incêndios, especialmente no período entre 16 e 19 de agosto de 2020.

Para essa análise, foram selecionadas três imagens: uma referente ao período pré-fogo, outra imediatamente posterior ao evento (pós-fogo) e uma terceira adquirida em momento subsequente, com o objetivo de verificar a recomposição da vegetação, conforme proposto por Teobaldo e Baptista (2016). A seleção das imagens seguiu como critério principal a menor cobertura de nuvens, respeitando-se o intervalo temporal correspondente a cada evento analisado. A Tabela 7 apresenta as imagens utilizadas para cada incêndio.

Tabela 7 - Data dos focos de incêndios e das imagens analisada

Data do foco	Data da imagem pré-incêndio	Data da imagem após-incêndio	Data da imagem para verificação da vegetação
17/08/2020	2020-08-12-00_00_2020-08-12-23_59_Sentinel-2_L2A_B08_(Raw)	2020-08-27-00_00_2020-08-27-23_59_Sentinel-2_L2A_B08_(Raw)	2020-09-06-00_00_2020-09-06-23_59_Sentinel-2_L2A_B08_(Raw)
	2020-08-12-00_00_2020-08-12-23_59_Sentinel-2_L2A_12_(Raw)	2020-08-27-00_00_2020-08-27-23_59_Sentinel-2_L2A_B12_(Raw)	2020-09-06-00_00_2020-09-06-23_59_Sentinel-2_L2A_B12_(Raw)

Org: Santos (2025)

Para estimar a severidade das áreas queimadas, os valores são escalonados para 10^3 e os índices são classificados de acordo com os intervalos estabelecidos por Key e Benson (2006), os quais são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Classificação de severidade do incêndio

Severidade NBR	Intervalo de dNBR
Alto crescimento da vegetação	-500 a - 250
Baixo crescimento da vegetação	-250 a -101
Áreas estáveis ou sem queima	-0.100 a +0.099
Severidade moderada	+0.100 a 0.296
Moderada – baixa	+0.270 a 0.439
Moderada – alta	+0.440 a + 0.659
Alta	+0.660 a +1.300

Fonte: Key e Benson (2006) adaptado por Ardila et. al (2023)

Para os autores os valores negativos indicam o crescimento da vegetação, ou seja, ausência de queimadas, enquanto os valores positivos indicam a ocorrência de incêndios, sendo que quanto maior o valor, maior a gravidade da queima sobre a vegetação (Silva et al., 2023).

CAPÍTULO IV

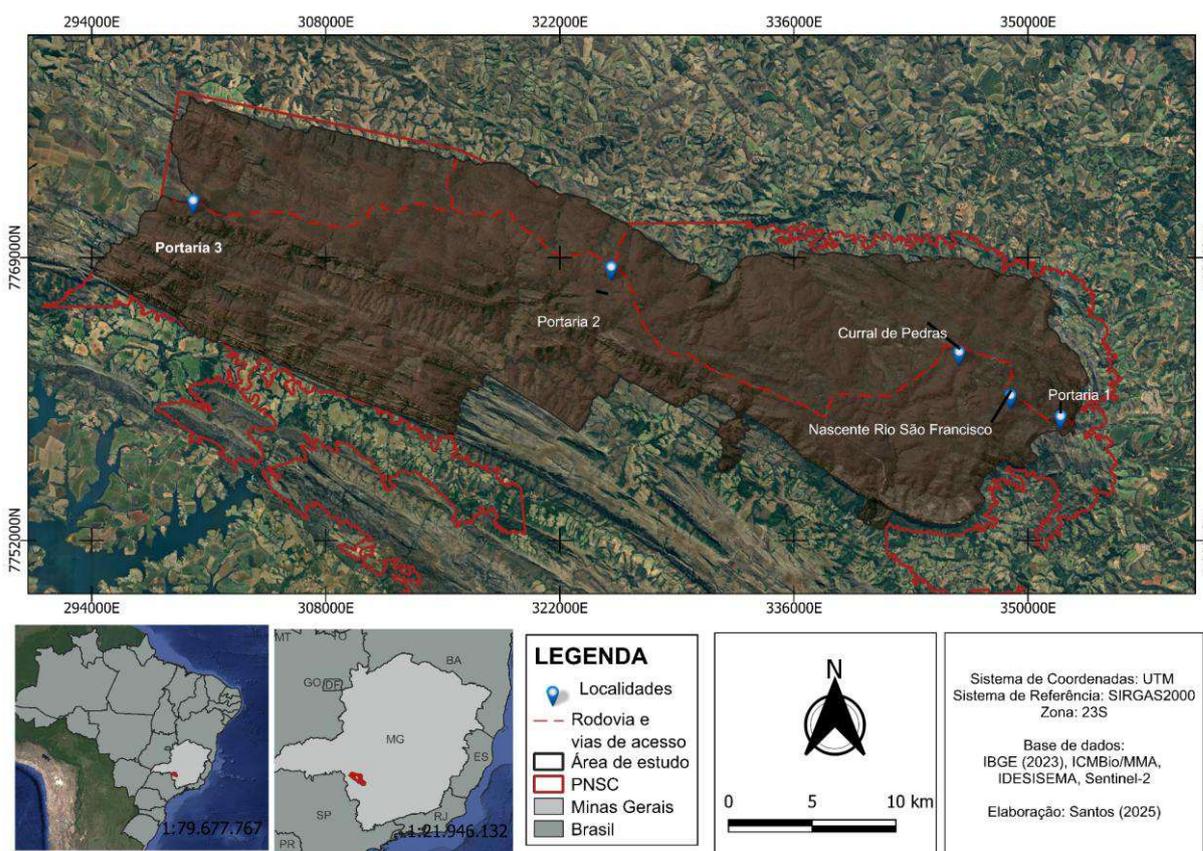


4. CARACTERIZAÇÃO DA SERRA DA CANASTRA

4.1 Introdução

A área de estudo está inserida no Parque Nacional da Serra da Canastra (PNSC), localizado na porção centro-oeste do estado de Minas Gerais, a aproximadamente 320 km da capital, Belo Horizonte. A área selecionada abrange partes dos municípios de São Roque de Minas, Sacramento e Delfinópolis, totalizando 71.228 hectares (ICMBio, 2023). A Figura 8 apresenta o mapa de localização da área de estudo.

Figura 8 - Mapa de localização da área de estudo



O Parque Nacional da Serra da Canastra é constituído por chapadas, depressões e serras que configuram uma paisagem geomorfológica bastante distinta. A área de estudo situa-se entre duas dessas unidades de relevo: o Chapadão do Diamante, a leste, e o Chapadão da Zagaia, a oeste. Além disso, abrange a Serra das Sete Voltas e parte da depressão intermontana, compondo um conjunto de formas estruturais que influenciam diretamente os padrões de drenagem, vegetação e suscetibilidade aos incêndios (Messias, 2018). A área corresponde a uma das porções mais antigas e consolidadas sob domínio do ICMBio

No Chapadão do Diamante localiza-se a nascente histórica do Rio São Francisco. Além disso, é uma área que apresenta uma rede de drenagem particularmente rica, integrando alguns

dos principais rios de Minas Gerais. Entre eles, destacam-se o Rio Araguari, o Ribeirão das Posses, que compõe a bacia do Rio Paraíba do Sul, e o Rio Santo Antônio, afluente do Rio Doce (ICMBIO/MMA, 2023, Messias, 2018).

4.2 Geologia

A paisagem da área de estudo é resultado direto da interação entre os aspectos geológicos e os processos climáticos que atuaram na região ao longo do tempo. Sua evolução está vinculada ao contexto tectônico da Faixa Brasília, estrutura formada a partir de eventos colisionais associados à consolidação do supercontinente Gondwana. Esses processos de colisão promoveram intensas fases de deformação, metamorfismo e magmatismo (Nazar, 2018).

A Serra da Canastra está situada majoritariamente na Província Estrutural do Tocantins, integrando o domínio da Faixa Brasília. Parte de sua extensão, entretanto, encontra-se inserida na Província do Paraná, correspondente a uma bacia sedimentar de cobertura associada à fase de estabilização da Plataforma Sul-Americana (Messias, 2018).

A geologia regional, conforme descrito por Chaves et al., (2008), apresenta um arranjo estrutural complexo. As rochas mais antigas do PNSC pertencem ao Grupo Piumhi; entretanto, na área de estudo, as unidades geológicas mais antigas correspondem ao Grupo Canastra, de idade Mesoproterozoica, composto por metassedimentos que estruturam a serra. Predominam quartzitos, geralmente de coloração branca e granulação fina, intercalados por níveis métricos de filitos sericíticos (Chaves et al., 2008).

Na porção oeste da área de estudo, já inserida na Bacia do Paraná, ocorrem rochas pertencentes ao Grupo Bauru, de idade Cretáceo Superior. Essa unidade é composta predominantemente por arenitos, arenitos conglomeráticos e conglomerados, cuja deposição está associada aos processos tectônicos relacionados ao soerguimento do Alto Paranaíba (Hasui et al, 1975 apud Chaves et al., 2008).

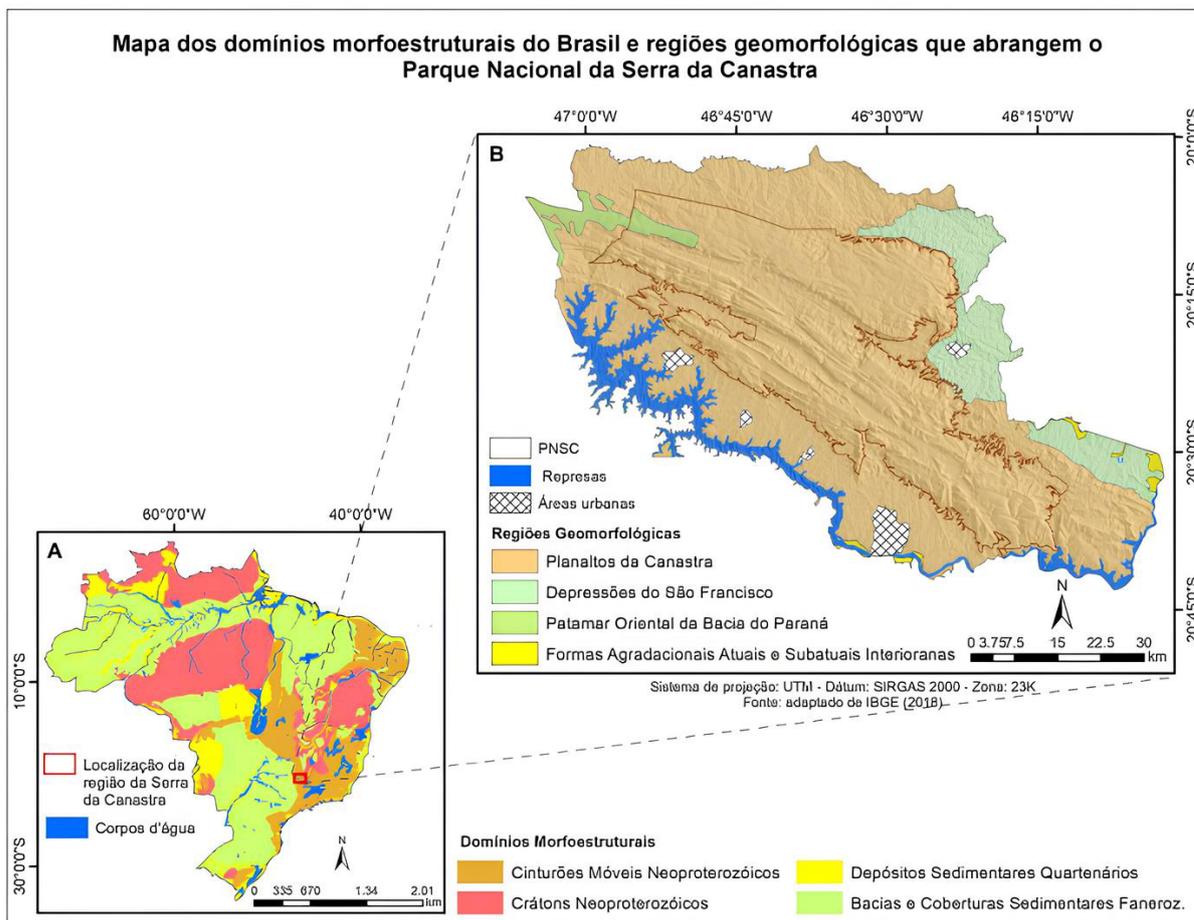
O Grupo Bauru é apontado como a fonte mais provável dos diamantes encontrados em sedimentos recentes e sub-recentes explorados na região, devido ao retrabalhamento e à dispersão desses minerais a partir das unidades cretáceas (Chaves et al., 2008).

4.3 Geomorfologia

O PNSC está inserido nos Cinturões Móveis Neoproterozóico, domínio morfoestrutural que condiciona a presença de extensos planaltos, alinhamentos serranos e depressões interplantálticas, desenvolvidos em terrenos dobrados e falhados. A litomorfoestrutura dessa região resulta da atuação conjunta de processos climáticos pretéritos e atuais, fornecendo características genéticas comuns e agrupando feições semelhantes (Messias, 2018).

Nesse contexto, a maior parte da área de estudo encontra-se inserida nos Planaltos da Canastra, enquanto uma porção menor recai sobre o Patamar Oriental da Bacia do Paraná, como é apresentado na Figura 9. Os Planaltos da Canastra são caracterizados pela ocorrência de cristas, barras e vales estruturais, fortemente condicionados pela orientação NW–SE (Messias, 2018).

Figura 9 - Mapa de Domínio Morfoestrutural e Regiões Geomorfológicas do PNSC



Fonte: Messias (2018)

Na área de estudo, os Planaltos da Canastra subdividem-se entre a Serra da Canastra, cujas altitudes variam entre 776 m e 1.493 m, e os Patamares da Canastra, que se situam entre 1.027 m e 1.384 m. Conforme descrito por Messias (2018), a Serra da Canastra constitui uma serra residual, enquanto seus extensos topos planos, com características de chapadas, estão associados a processos erosivos anteriores ao Cretáceo.

4.4 Clima e Hidrografia

Conforme descrito no Plano de Manejo Integrado do Fogo, o Parque Nacional da Serra da Canastra está inserido em uma região de clima Tropical Típico, caracterizado por duas estações bem definidas. A estação úmida estende-se de outubro a março, apresentando excedente hídrico especialmente entre dezembro e fevereiro. Já a estação seca ocorre entre abril e setembro, período no qual se registra déficit hídrico, particularmente entre junho e agosto, que correspondem também aos meses com as temperaturas mais baixas do ano (ICMBio, 2022).

Os estudos de Novais (2011), indicam que o período entre dezembro e fevereiro concentra os maiores índices pluviométricos na região, respondendo por mais de 60% da precipitação anual. Esse padrão está associado à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que intensifica a ocorrência de chuvas convectivas e frontais, resultando em totais pluviométricos que variam entre 600 e 900 mm nesses meses. Em contraste, durante o inverno (junho a agosto), a influência de massas de ar polar atlântica contribui para a significativa redução das precipitações, podendo ocorrer até 100 dias consecutivos sem chuva.

A topografia influencia na variação do microclima (Nazar, 2018). A temperatura média anual varia entre 18°C e 20°C, no mês mais frio a temperatura fica abaixo de 15°C (Novais, 2011)

Em áreas de Cerrado, as menores taxas de umidade relativa do ar ocorrem tipicamente durante o outono e o inverno, período que também apresenta maiores intensidades de vento (Bastos e Ferreira, 2010). Em seu estudo, Messias (2018) apresenta a variação da umidade relativa com base nas médias de 2003 e 2004, destacando que os valores mínimos concentram-se entre agosto e setembro.

O parque compreende uma zona de recarga regional, em função das altitudes elevadas, da presença de aquíferos fissurais e do predomínio de rochas quartzíticas, conjunto que exerce forte influência sobre a dinâmica dos fluxos hídricos, tanto superficiais quanto subsuperficiais (MMA/ICMBio, 2022).

Além disso, a área abriga importantes cabeceiras de drenagem, contribuindo para a formação de relevantes bacias hidrográficas, entre as quais se destacam as nascentes dos rios São Francisco, Araguari, Santo Antônio, Bateias, Grande e do Ribeirão Grande (Confessor, 2023).

4.5 Vegetação

As formações do Cerrado caracterizam-se por ampla variedade fisionômica, podendo ser compreendidas como um gradiente de fitomassa condicionado por diversos fatores, tais como topografia, tipos de solo, clima, interferência antrópica e a ação do fogo. Essa organização em gradientes pode ser designada como um ecótono campo–floresta (Silva, 2006).

A Serra da Canastra pertence ao domínio dos chapadões tropicais interiores com cerrados e florestas de galerias (Ab’Saber, 1970). A maior parte da serra é coberta por formações campestres, que englobam as fitofisionomias: Campo Rupestre, Campo Limpo e Campo Sujo, Cerrado *Stricto Sensu* e Cerrado Rupestre (Ribeiro e Walter, 1998).

Os estudos de Júnior et al. (2010) indicam que, entre o Chapadão do Zagaia e o Chapadão do Diamante, os campos limpos são as fitofisionomias mais presentes. Essa formação caracteriza-se pela presença de um estrato herbáceo contínuo, com poucos arbustos e ausência de árvores (Júnior et. al (2010); Messias (2018)).

A distribuição das fitofisionomias segue a sequência de Campo Sujo, Cerrado *stricto sensu*, Mata de Galeria e Campo Úmido (Júnior et al., 2010). Os campos sujos correspondem a formações herbáceo-arbustivas, caracterizadas por cobertura herbácea densa, associada à presença de indivíduos subarbutivos e arbustivos, além de ocorrência menos frequente de elementos arbóreos de pequeno porte (Messias e Ferreira, 2020; Ribeiro e Walter, 1998).

O Cerrado *Stricto Sensu* é formado por árvores baixas, inclinadas e tortuosas, com ramificações irregulares e retorcidas, com arbustos e subarbutos espalhados, e algumas espécies com órgãos subterrâneos perenes (xilopódios), que permitem a rebrota pós queima ou corte (Messias, 2018; Ribeiro e Walter, 1998).

A Mata de Galeria e Campo Úmido, ocorrem no interior dos chapadões, acompanhando córregos e rios de pequeno porte, formando corredores fechados (galeria). A altura do estrato arbóreo varia entre 20 e 30 metros e não apresenta deciduidade na estação seca (Messias e Ferreira, 2020; Ribeiro e Walter, 1998).

Devido aos usos anteriores a criação do parque, e devido ao uso do fogo na renovação de pastagens, todas as formações florestais da região sofreram alterações, em diferentes graus (Messias, 2018).

CAPÍTULO V



5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 INTRODUÇÃO

Os fatores utilizados na elaboração dos mapas de risco são compreendidos como indicadores da suscetibilidade à ocorrência de incêndios. Nesse sentido, o risco estrutural representa a probabilidade de ignição associada a elementos relativamente estáveis da paisagem, como características topográficas e padrões de uso e ocupação do solo. Por outro lado, o risco dinâmico contempla variáveis meteorológicas, cuja variabilidade temporal influencia diretamente as condições de umidade, temperatura e, conseqüentemente, a probabilidade de propagação do fogo. A integração entre ambos os componentes permite uma avaliação abrangente e integrada da propensão à ocorrência de incêndios na região da Serra da Canastra.

5.2 Risco Estrutural de Incêndio Florestal

No âmbito dos resultados referentes ao risco estrutural, foi possível elaborar o mapeamento da suscetibilidade a incêndios na Serra da Canastra com base nos temas de Uso e Ocupação do Solo, Declividade, Distância das Estradas, Orientação das Vertentes e Altitude. A seguir, apresentam-se os mapas produzidos e, posteriormente, as análises correspondentes.

No que se refere ao Uso e Ocupação do Solo, as classes de suscetibilidade ao fogo indicam predominância da categoria Muito Alta, que abrange aproximadamente 42% da área de estudo. Essa classe é composta principalmente pelas Formações Savânicas e Campestres, que representam, respectivamente, 10,79% e 31,60% da área analisada. Em seguida, observa-se a predominância da categoria Muito Baixa, que corresponde a 29,47% da área de estudo. Essa classe é composta pelos Afloramentos Rochosos e pelo Campo Alagado, que representam 26% e 3,38%, respectivamente.

A categoria Moderada abrange 24,17% da área e é formada por Pastagens (19,41%) e Outras Áreas Não Vegetadas (4,75%). Por fim, a categoria Alta corresponde a 3,98%, sendo constituída exclusivamente pela Formação Florestal, que apresenta o mesmo percentual.

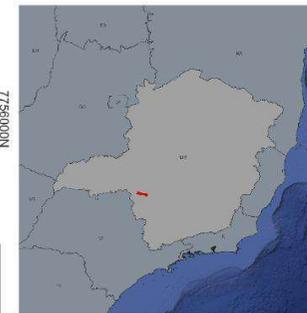
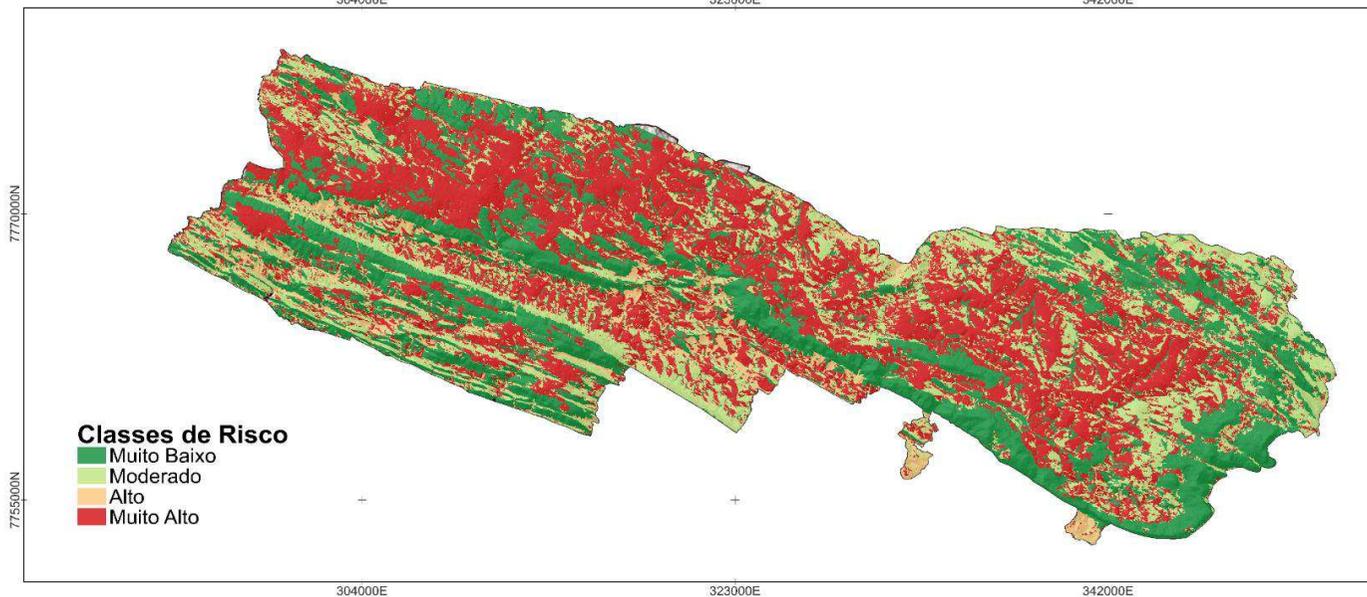
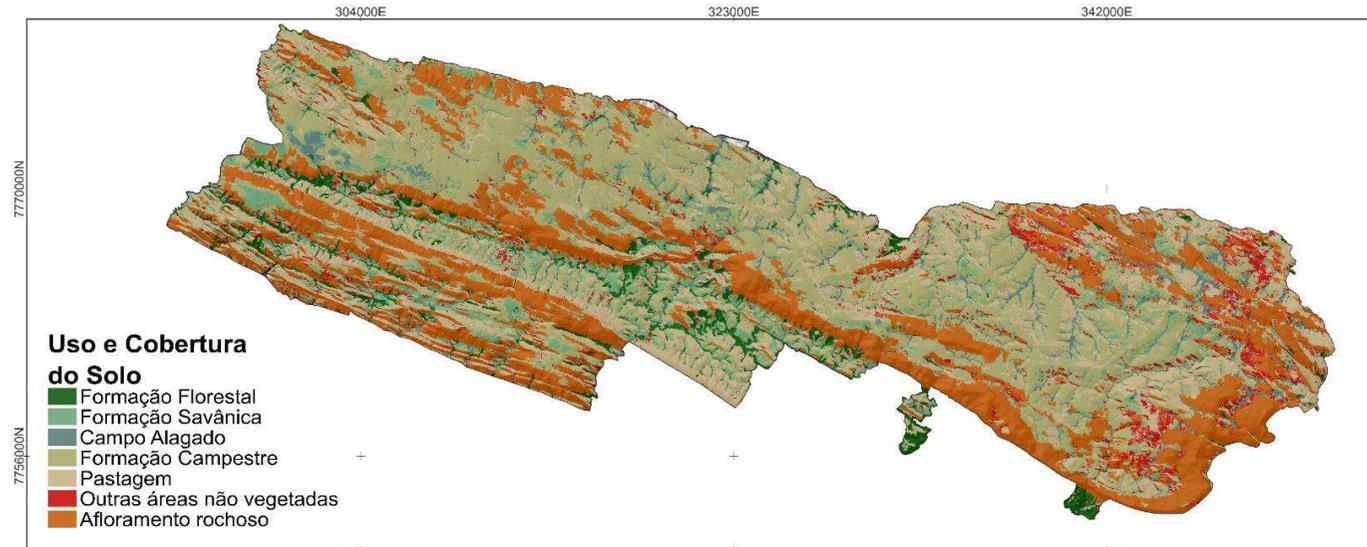
Os resultados detalhados podem ser observados nas Tabelas 9 e 10 e na Figura 10.

Tabela 9 - Área ocupada pelas classes de Uso e Cobertura

Classe de Uso	Classe de Risco	Área (km²)	%
Formação Campestre	5	224,53	31,60
Formação Savânica	5	76,65	10,79
Formação Florestal	4	28,27	3,98
Pastagem	3	137,95	19,41
Outras Áreas Não Vegetada	3	33,38	4,75
Afloramento Rochoso	1	185,38	26,09
Campo Alagado	1	21,01	3,38
	TOTAL	710,59	100

Org: Santos (2025)

Figura 10 - Mapa de Uso e Cobertura e Classe de Risco da Serra da Canastra



Sistema de Coordenadas: UTM
 Sistema de Referência: SIRGAS2000
 Zona: 23S

Base de dados: Mappiomas (2023)

Elaboração: Santos (2025)

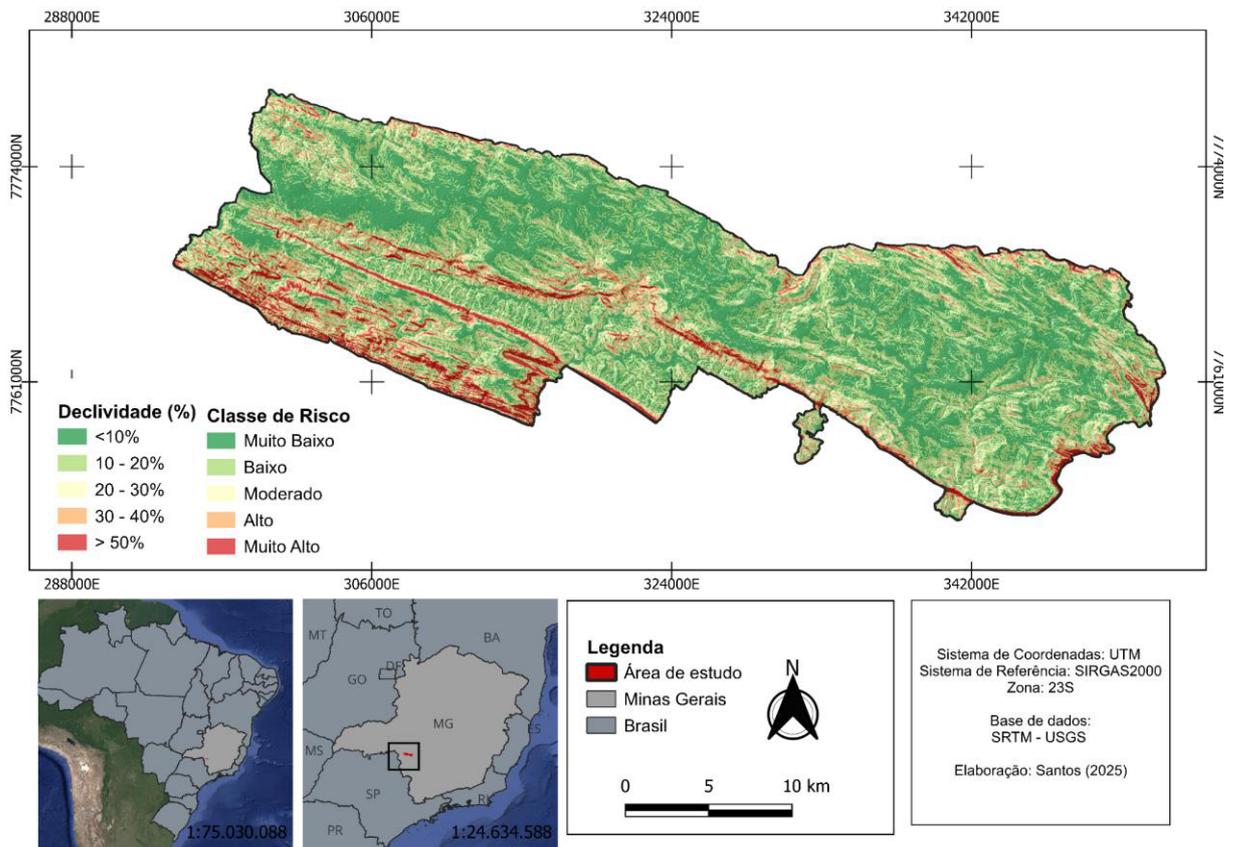
Como o número de classes de declividade corresponde ao número de classes de risco adotadas, o mapa de suscetibilidade por declividade (Figura 11), juntamente com a Tabela 10, apresenta a relação direta entre as faixas de declividade e os respectivos níveis de risco associados.

Tabela 10 - Área ocupada pelas classes de Declividade (%)

Declividade	Classe de Risco	Área (km ²)	%
<10 %	1	260,89	36,73
10 - 20%	2	247,62	34,86
10 - 30%	3	95,69	13,47
10 - 50%	4	70,19	9,88
> 50%	5	35,93	5,06
TOTAL		710,33	100

Org: Santos (2025)

Figura 11 - Mapa de Declividade e Classes de Risco



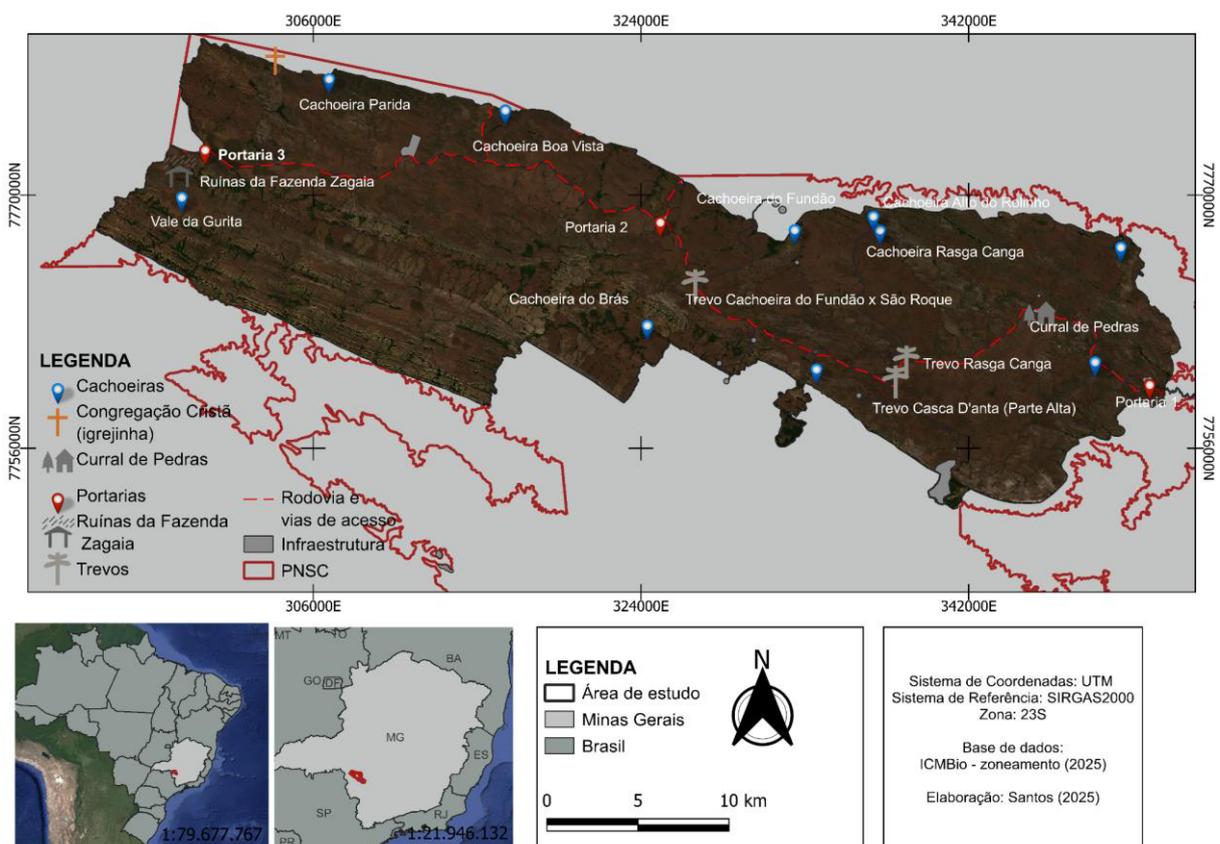
A área de estudo encontra-se predominantemente nas classes Muito Baixa e Baixa, correspondentes às faixas de declividade < 10% e entre 10% e 20%, que representam 36,73% e 34,86% da área, respectivamente. Juntas, essas duas categorias abrangem mais da metade da

extensão da Serra da Canastra. As demais classes seguem a ordem crescente de declividade, refletindo níveis de risco Moderado, Alto e Muito Alto, em conformidade com a classificação adotada.

A distância das estradas e demais infraestruturas constitui um fator de relevância bidirecional. Por um lado, essas áreas concentram maior circulação humana, o que potencializa a probabilidade de ignição e, portanto, eleva o risco de ocorrência de incêndios florestais. Por outro lado, tais vias também desempenham papel estratégico nas ações de prevenção, monitoramento e contenção do fogo, funcionando como rotas de acesso para equipes de manejo e combate (Durlevi c et al., 2021).

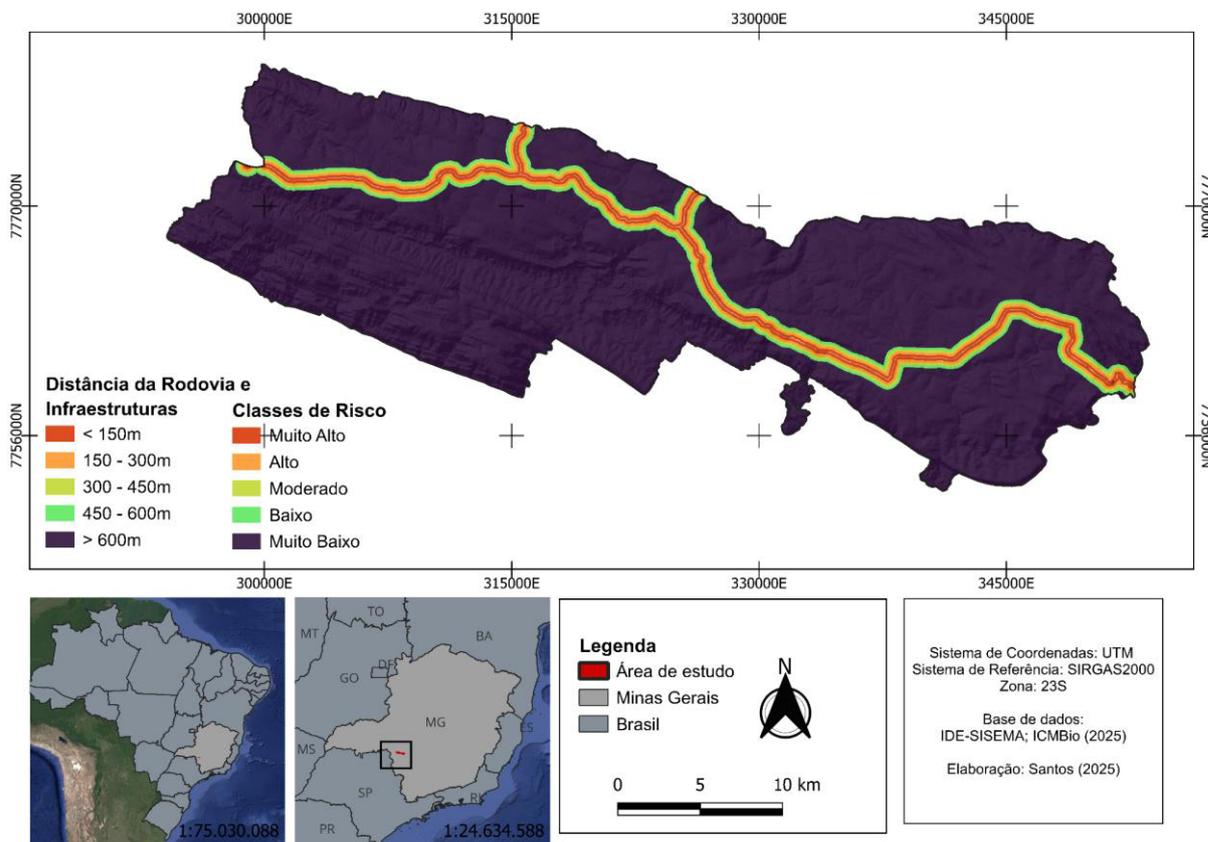
A  rea de estudo encontra-se inserida na Zona de Conserva o, um espaço que foi consolidado como Unidade de Conserva o há mais tempo. Nessa região, a presença humana ocorre principalmente por meio de analistas e técnicos do ICMBio, além dos visitantes (ICMBio, 2023). A figura 12 apresentada representa a configura o dessa zona, na qual a circula o de visitantes está fortemente associada   presença de atrativos naturais, especialmente as cachoeiras.

Figura 12 - Rodovias e Infraestruturas da área de estudo



O mapa de suscetibilidade foi elaborado a partir de intervalos de 150 m, classificação baseada no trabalho de Souza, (2022). A figura 13 apresenta a classificação.

Figura 13 - Mapa de Classes de risco da Distância das rodovias e infraestruturas



A Tabela 11 apresenta a distribuição quantitativa das classes de risco mapeadas para a área de estudo.

Tabela 11 - Distância das rodovias e infraestruturas e Classes de riscos

Distância (m)	Classe de Risco	Área (km ²)	%
< 150m	5	39,71	5,59
150 - 300m	4	30,72	4,33
300 - 450m	3	29,87	4,21
450 - 600m	2	28,99	4,98
>600m	1	580,91	81,79
TOTAL		710,27	100

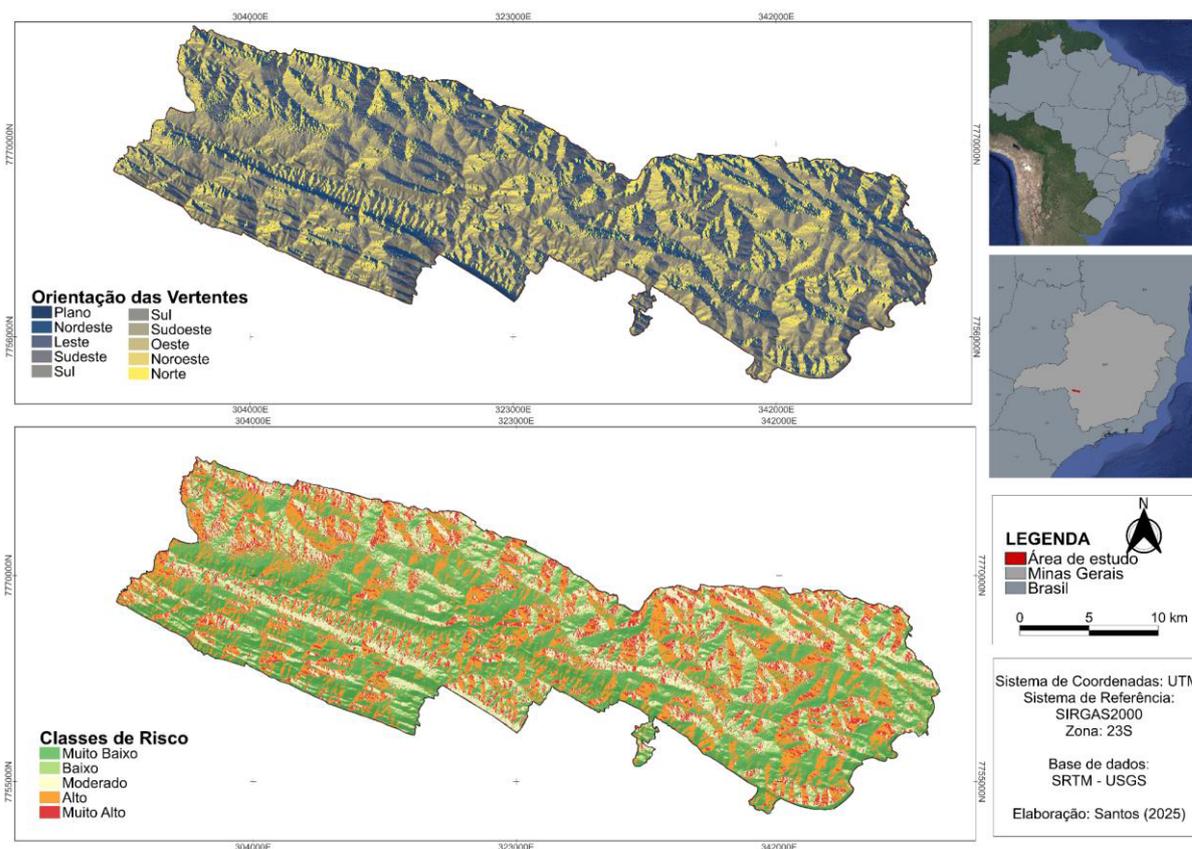
Org: Santos (2025)

A área de estudo encontra-se majoritariamente (81,79%) na classe de risco Muito Baixa, correspondente às áreas onde estradas, infraestruturas, trilhas e caminhos se situam a mais de

600 metros de distância. Em seguida, destaca-se a classe Muito Alta, que abrange 5,59% da área, representando os locais mais próximos a essas estruturas e, portanto, mais suscetíveis à ocorrência de ignições associadas à presença humana.

As regiões cujas encostas se orientam para o norte, nordeste e noroeste tendem a apresentar maior suscetibilidade à ocorrência de incêndios florestais, em função da maior incidência de radiação solar nessas exposições (Souza, 2022). A Figura 14 apresenta a distribuição das vertentes na Serra da Canastra, e em sequência as classes de risco.

Figura 14 - Mapa de Orientação das Vertentes e Classe de Risco



As Tabelas 12 e 13 apresentam a distribuição da área de estudo segundo as classes de orientação das vertentes e os respectivos níveis de risco associados.

Tabela 12 - Distribuição da Orientação das Vertentes

Orientação	Classe de risco	Área (km ²)	%
Norte (N)	5	123,23	17,66
Noroeste (NO)	4	81,05	11,61
Nordeste (NE)	4	81,61	11,69
Oeste (O)	3	70,49	10,10

Leste (L)	2	60,58	8,68
Sul (S)	1	118,57	16,99
Sudoeste (SO)	1	87,67	12,56
Sudeste	1	74,77	10,71
TOTAL		698,00	100

Org: Santos (2025)

Uma pequena parcela das vertentes (menos de 1%) apresenta relevo plano e, por esse motivo, não foi incluída na hierarquização das orientações. A análise evidencia que a distribuição das orientações é relativamente homogênea ao longo da área de estudo. As maiores diferenças concentram-se nas vertentes voltadas para o Norte (17,66%), Sul (16,99%) e Leste (8,68%). Entre as classes de risco, a Serra da Canastra apresenta predominância da categoria Muito Baixa (40,26%), formada pela combinação das vertentes voltadas para o Sudeste, Sul e Sudoeste, que recebem menor incidência direta de radiação solar. Em seguida, destaca-se a classe Alta, associada às vertentes orientadas para Nordeste e Noroeste, que apresentam maior exposição solar ao longo do dia.

Tabela 13 - Distribuição das Orientações das Vertentes por Classe de Risco

Orientação	Classe de risco	Área (km²)	%
N	5	123,23	17,66
NO, NE	4	151,54	21,71
O	3	70,49	10,10
E	2	60,58	8,68
SE, S, SO	1	281,02	40,26
TOTAL		698,00	100

Org: Santos (2025)

Um aspecto relevante é que a classe Muito Alta, representada exclusivamente pelas vertentes voltadas para o Norte, concentra 17,66% da área total. A altitude apresenta uma relação inversamente proporcional à suscetibilidade a incêndios florestais: áreas situadas em menores elevações tendem a apresentar maior vulnerabilidade quando comparadas às regiões mais altas (Sousa, 2022). A Figura 15 apresenta o mapa altimétrico e da distribuição das Classes de Risco da Serra da Canastra. A Tabela 14 apresenta a distribuição da área altimétrica de acordo com as classes de risco estabelecidas.

Figura 15 - Mapa altimétrico e da distribuição das Classes de Risco da Serra da Canastras.

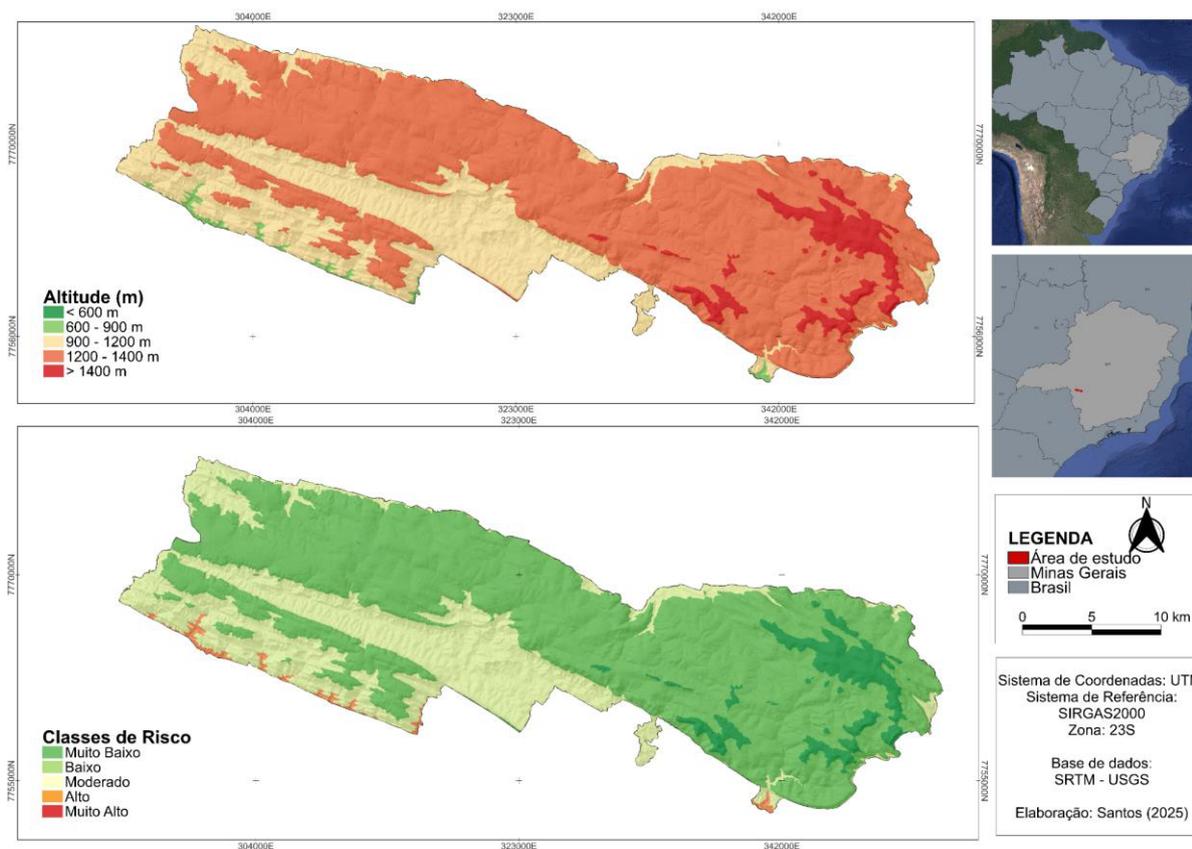


Tabela 14 - Distribuição da altimetria pela Classe de Risco

Altitude	Classe de Risco	Área (km ²)	%
600 - 900 m	5	6,39	0,90
900 - 1200 m	3	199,34	28,06
1200 - 1400 m	2	497,42	70,01
>1400 m	1	7,30	1,03
TOTAL		710,46	100

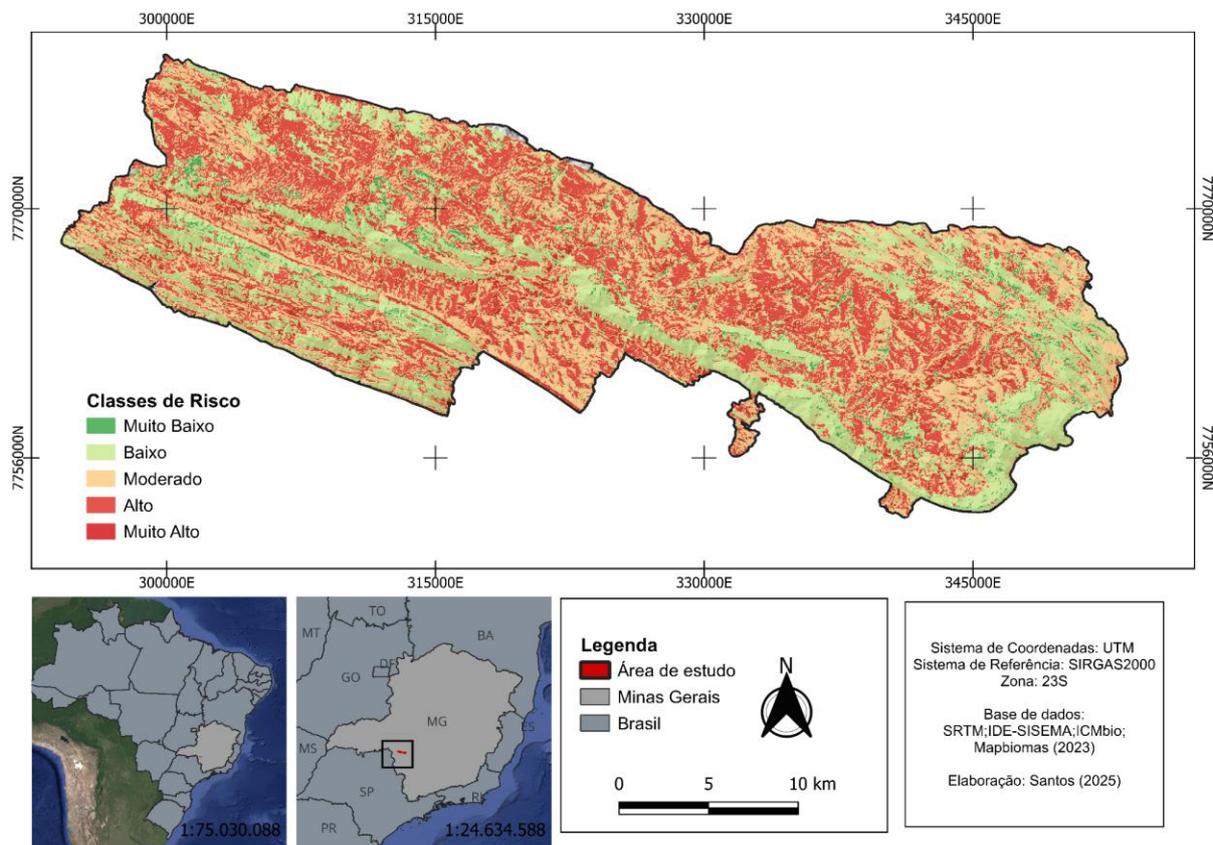
Org: Santos (2025)

A área de estudo é composta majoritariamente por altitudes entre 1200 e 1400 m, que correspondem a aproximadamente 70% da sua extensão. Essa faixa altimétrica enquadra-se na classe de Baixo Risco. Em seguida, destacam-se as altitudes entre 900 e 1200 m, que representam 28,06% da área total.

A sobreposição dos mapas de suscetibilidade ao fogo, elaborados a partir dos fatores estruturais, resultou no mapa de Risco Estrutural de Incêndios Florestais da Serra da Canastra.

A classificação final foi organizada em cinco categorias: Muito Baixa, Baixa, Moderada, Alta e Muito Alta. O mapa temático correspondente é apresentado na Figura.

Figura 16 - Mapa de risco estrutural de incêndios florestais da Serra da Canastra



A Tabela 15 apresenta a distribuição das classes de risco no interior da área de estudo, permitindo identificar a proporção ocupada por cada categoria de suscetibilidade ao fogo.

Tabela 15 - Distribuição das classes de risco na área de estudo

Classe de risco	Área (km ²)	%
1	4,13	0,58
2	201,95	28,43
3	174,64	24,59
4	325,53	45,83
5	4,03	0,57
TOTAL	710,31	100

Org: Santos (2025)

A partir da análise dos resultados do risco estrutural, verifica-se que a área da Serra da Canastra encontra-se predominantemente classificada como Alta, abrangendo 45,83% da área

total. Essa classe apresenta distribuição relativamente homogênea ao longo de toda a área de estudo, sendo representada no mapa pela coloração alaranjada.

A classe Muito Alta corresponde a menos de 1% da área e apresenta concentração sobretudo nas proximidades das rodovias. Já a segunda classe mais expressiva é a Baixa, indicada no mapa pela cor verde clara e distribuída de forma a margear as áreas classificadas como Alta.

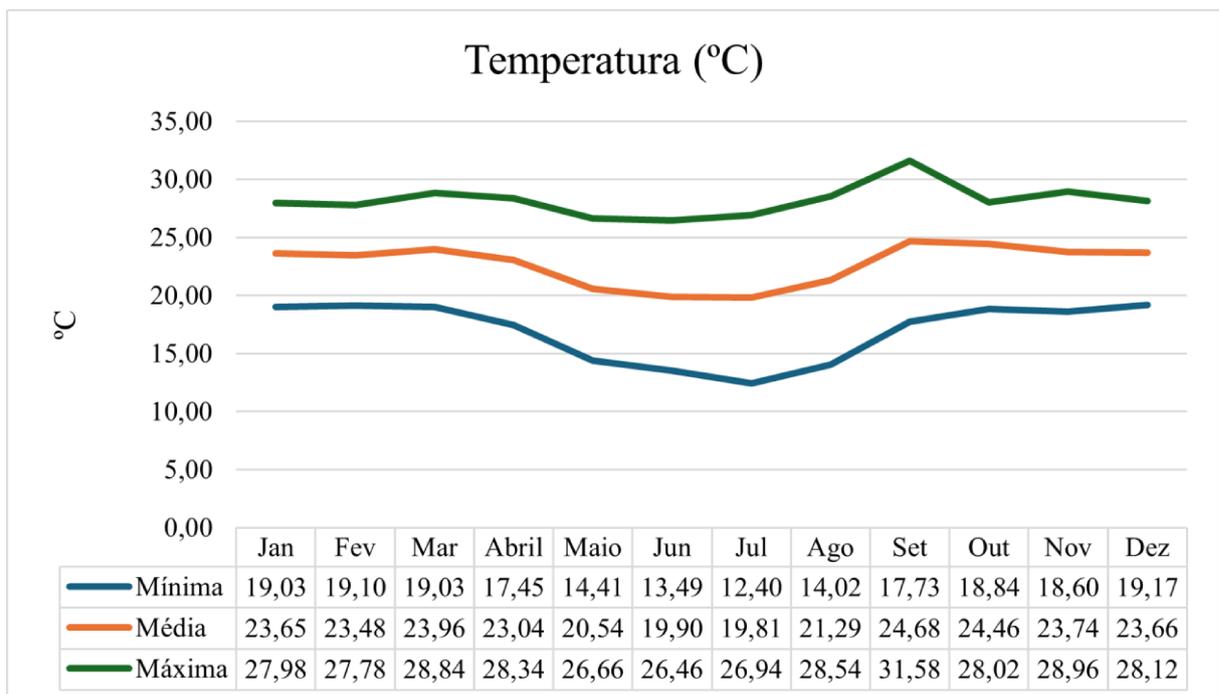
5.3 Risco Dinâmico de Incêndio Florestal

O risco dinâmico tem como objetivo identificar as variações temporais nos fatores capazes de provocar mudanças na inflamabilidade dos combustíveis vegetais ao longo do tempo (Prudente, 2016b). Nesse contexto, foram considerados os dados de NDVI, precipitação e temperatura.

Conforme apresentado anteriormente, a área de estudo apresenta duas estações climáticas bem definidas, de acordo com as informações do ICMBio. Entre dezembro e fevereiro, observa-se a ocorrência de excedente hídrico, decorrente do regime de precipitações mais intensas. Em contrapartida, o déficit hídrico torna-se mais acentuado entre junho e agosto.

A Figura 17 apresenta um gráfico com a variação das temperaturas mensais média, mínima e máxima, obtidas a partir dos dados interpolados das estações meteorológicas selecionadas, considerando o período de 2020 a 2024.

Figura 17 - Gráfico de temperaturas mensais (2020 -2024)

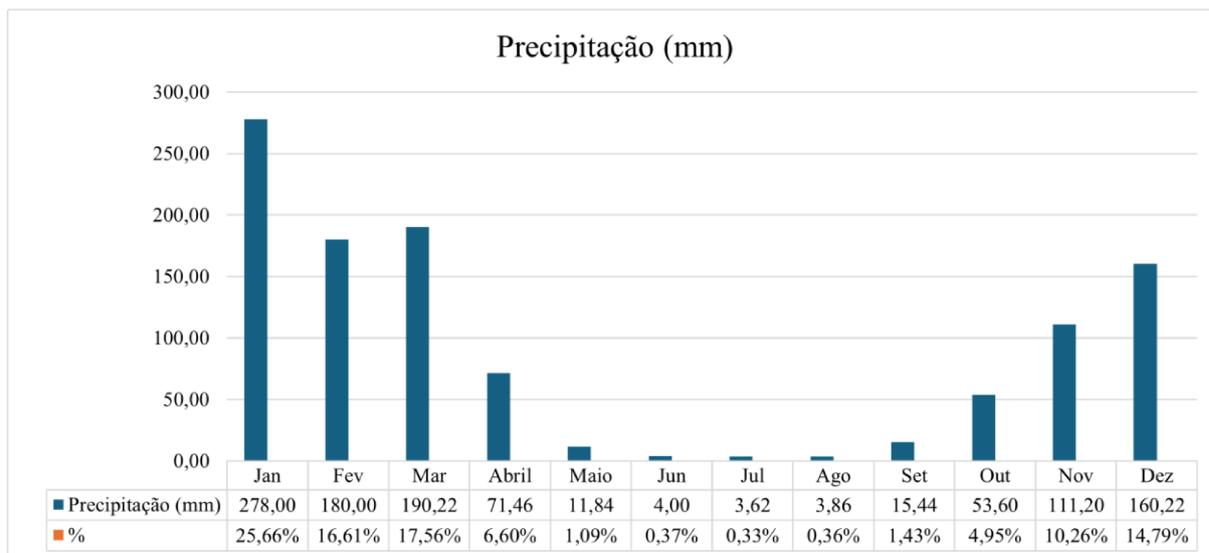


Org: Santos, 2025 adaptado do Agritempo

As menores temperaturas foram registradas nos meses de julho e agosto, com valores abaixo dos 15 °C, enquanto a temperatura máxima ocorreu no mês de setembro, superando os 30°C. As temperaturas médias possuem uma amplitude térmica de aproximadamente 4,5 °C

A Figura 18 ilustra o regime pluviométrico da área de estudo, também obtidos por meio dos dados interpolados.

Figura 18 - Média mensal do regime pluviométrico (2020 -2024)



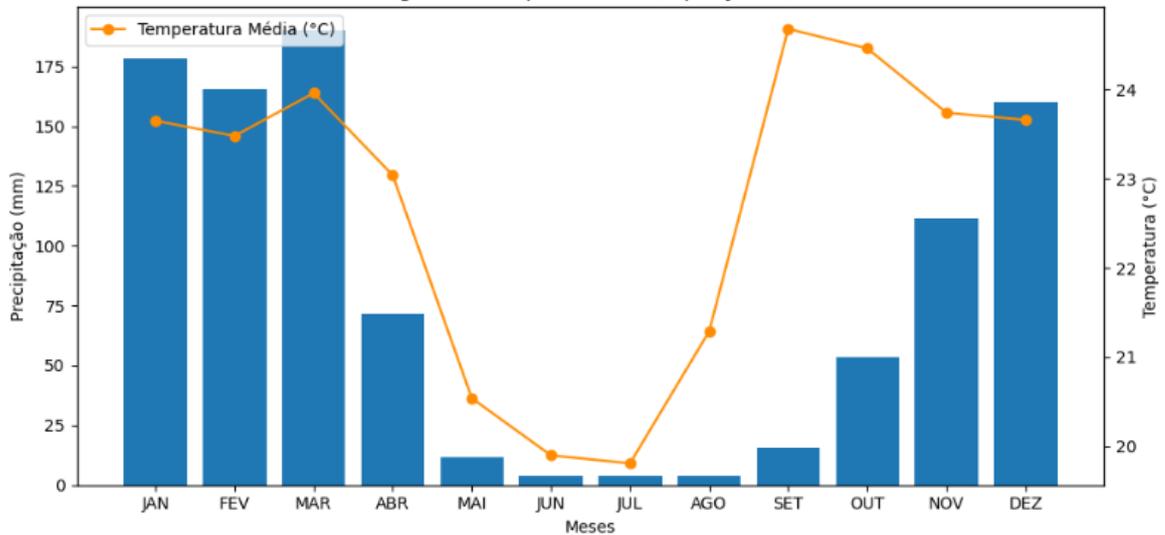
Org: Santos, 2025 adaptado Agritempo

Os dados indicam que aproximadamente 50% da precipitação anual concentra-se entre os meses de dezembro e fevereiro, com valores mensais superiores a 150 mm. Em contraste, o período compreendido entre junho e agosto apresenta acentuada redução nos índices pluviométricos. A análise dos registros das estações meteorológicas próximas à área de estudo evidencia que, em alguns desses meses, os valores de precipitação chegam a 3 mm, caracterizando um período de forte déficit hídrico, como descrito no Plano de Manejo do PNSC.

A Figura 19 apresenta um histograma com as temperaturas médias e o regime de precipitação.

Figura 19 - Histograma meteorológico

Histograma - Temperatura e Precipitação Mensal

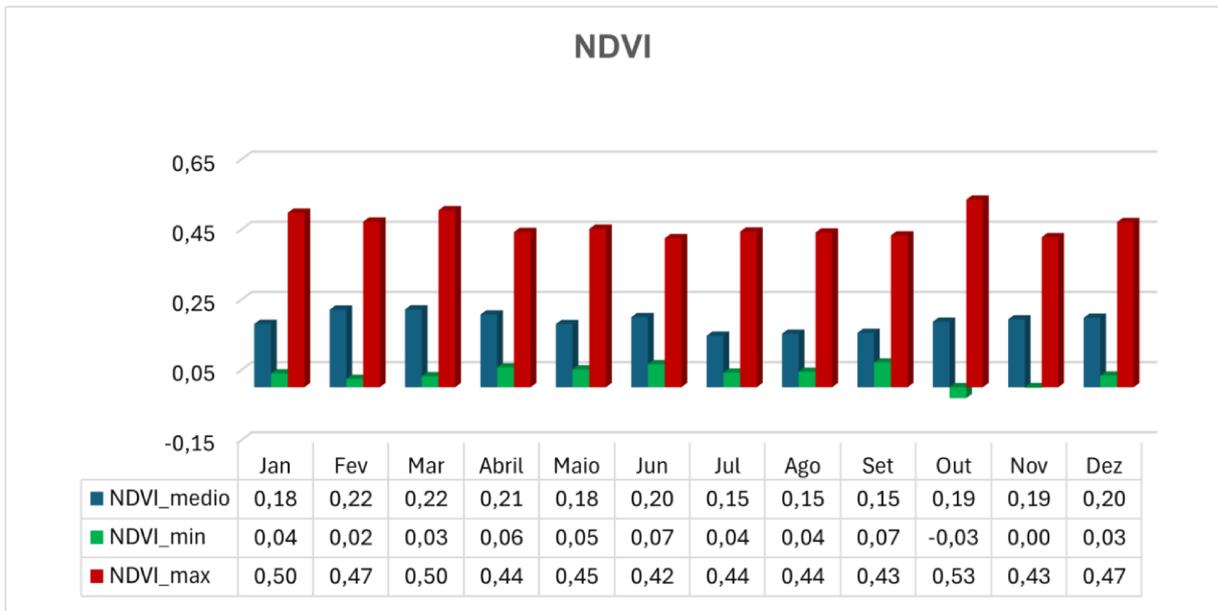


Org: Santos, 2025 adaptado Agritempo

Conforme apresentado pelos dados analisados e descrito no Plano de Manejo do PNSC, a Serra da Canastra apresenta um regime pluviométrico intenso nos meses de verão, período em que as temperaturas também se mantêm elevadas. Considerando os referenciais adotados para a elaboração da AHP (Ladislau et al., 2021; Prudente, 2016; Sousa, 2022), essa combinação de fatores tende a reduzir a suscetibilidade ao risco, uma vez que a precipitação possui peso superior ao da temperatura no modelo. Além disso, precipitações superiores a 150 mm são classificadas como de risco baixo para a ocorrência de incêndios (Dias, 2023; Júnior, 2022).

Os dados de NDVI são apresentados na Figura 20, o gráfico indica que os valores médios ficam entre 0,15 a 0,20.

Figura 20 - Gráfico de distribuição do NDVI por mês

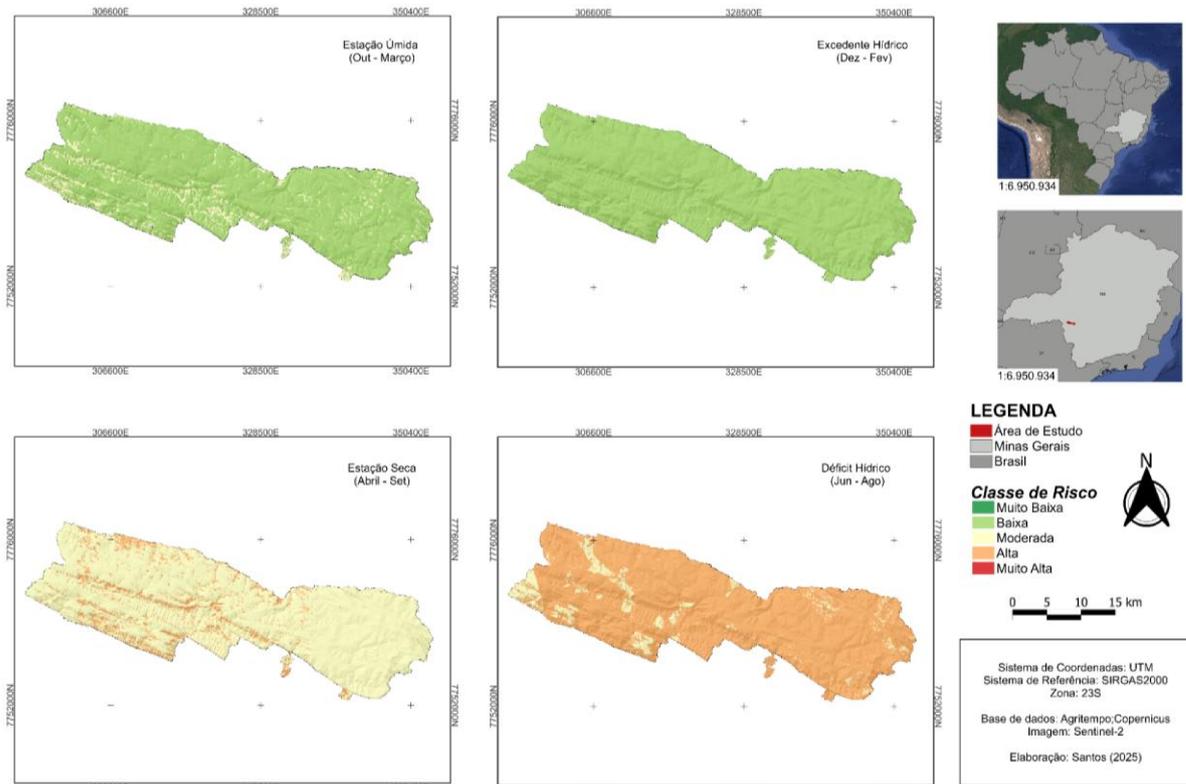


Org: Santos, 2025

No bioma Cerrado, os valores entre 0 a 0,25 são lidos como combustível pronto para queima, ou indicadores de alta suscetibilidade ao fogo (Prudente, 2016).

A Figura 21 apresenta os mapas de Risco Dinâmico elaborados para os quatro períodos selecionados.

Figura 21 - Mapa de Risco de Dinâmico da Serra da Canastra



O mapa de Risco Dinâmico, em conjunto com a análise do referencial adotado, indica que o verão quente e chuvoso se associa a áreas de menor suscetibilidade quando comparado à estação seca. Observa-se, ainda, uma diferença significativa entre os picos de suscetibilidade dessas estações, especialmente durante o período seco.

5.4 Risco Integrado de Incêndio Florestal

O risco estrutural é responsável por identificar as áreas mais propensas à ocorrência e à propagação de incêndios. Enquanto, o risco dinâmico atua na restrição dessas áreas ao incorporar o estado da vegetação e as condições meteorológicas, que variam ao longo do tempo. A integração entre esses dois índices fornece suporte à identificação de diferentes níveis e fases da probabilidade de ocorrência de incêndios, permitindo uma análise mais precisa e abrangente da dinâmica do fogo (Prudente, 2016b).

A utilização dos mapas de risco integrado dá suporte ao planejamento geral e permanente, permitindo planejar o desenho de aceiros, localizações de torres de vigia, e gestão de combustíveis (Chuvieco, 1999), e no caso da Serra da Canastra, o MIF.

São apresentados quatro resultados para o risco integrado de incêndios: dois correspondentes ao período chuvoso (Figura23: a, b), subdividido em período completo e período de excedente hídrico, e dois referentes ao período de estiagem (Figura23: c, d), incluindo o período completo e o período de deficiência hídrica.

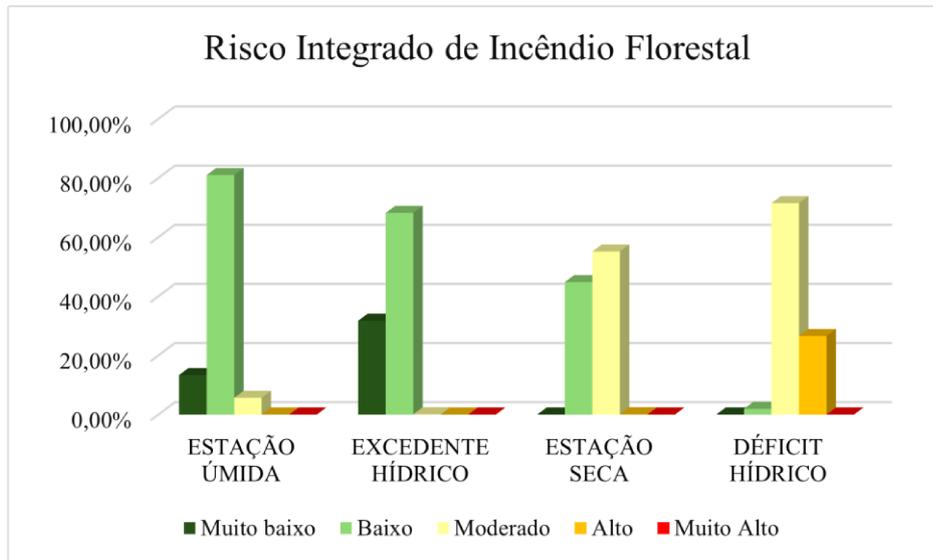
A Tabela 16, e o gráfico expõem a distribuição percentual das classes de risco integrado de incêndio.

Tabela 16 - área ocupada pelas classes de risco integrado de incêndio florestal

Risco Integrado	Estação úmida		Excedente Hídrico		Estação Seca		Déficit Hídrico	
	Área (km ²)	%						
Muito Baixo	93,62	13,37	222,10	31,72	0,00	0,00	0,00	0,00
Baixo	566,89	80,97	477,48	68,20	313,71	44,81	13,55	1,94
Moderado	39,61	5,66	0,53	0,08	385,83	55,11	501,17	71,58
Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	0,08	185,38	26,48
Muito Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	700,14	100	700,11	100	700,11	100	700,10	100

Org: Santos (2025)

Figura 22 - Gráfico da área ocupada pelas classes de risco integrado de incêndios florestais



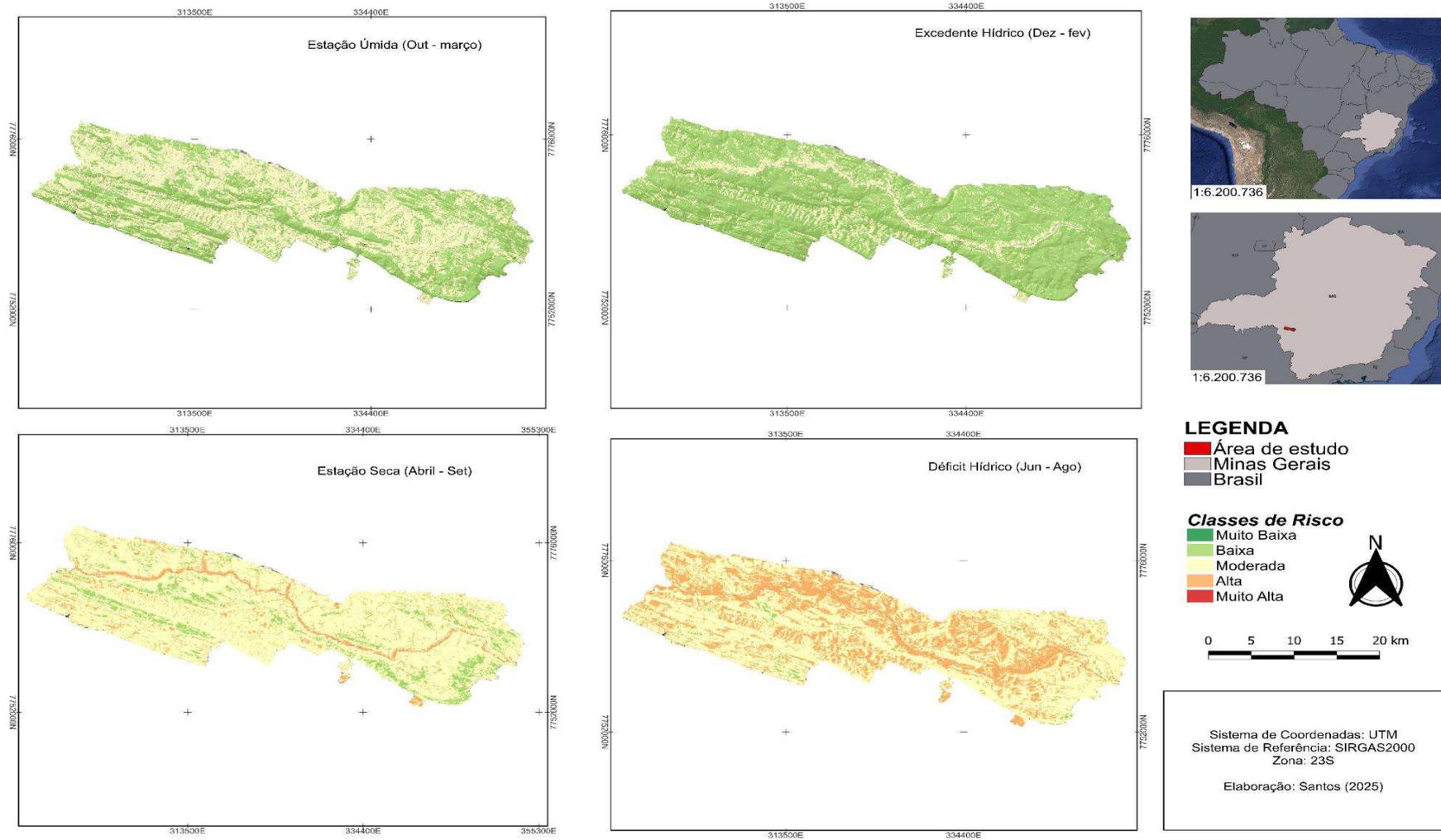
Org: Santos (2025)

Os resultados indicam que, no período compreendido entre outubro e março (estação úmida), as classes de risco concentram-se predominantemente entre Muito Baixa e Baixa. Considerando o conjunto desses meses, a classe Baixa representa mais de 80% da área analisada. Ao examinar especificamente o intervalo entre dezembro e fevereiro, caracterizado pelo excedente hídrico, observa-se a manutenção do predomínio da classe Baixa, acompanhada por um aumento da classe Muito Baixa, enquanto a classe Moderada apresenta valores próximos de zero. Esse padrão está associado ao regime pluviométrico, uma vez que esses meses registram totais mensais de precipitação superiores a 200 mm, além de temperaturas médias em torno de 23 °C, condições que reduzem a suscetibilidade à ocorrência de incêndios.

Em contraste, ao considerar a estação seca como um todo, verifica-se que a maior proporção da área se enquadra na classe de risco Moderada. Entre os meses de abril e setembro, observa-se também a presença expressiva da classe Baixa, com ambas apresentando diferenças percentuais em torno de 10%. No período compreendido entre junho e agosto (déficit hídrico), identifica-se um aumento da classe de risco Alta, embora a classe Moderada permaneça predominante.

Essa estação é caracterizada por um regime pluviométrico inferior a 100 mm mensais, com registros que, em alguns meses, se aproximam de 5 mm, além de maior variabilidade térmica em comparação à estação úmida, com temperaturas médias variando entre 19 °C e 22 °C. Esses fatores climáticos favorecem o ressecamento da biomassa e elevam a suscetibilidade à ocorrência e propagação de incêndios florestais.

Figura 23 - Mapa de Risco Integrado de Incêndios Florestais da Serra da Canastra



De modo geral, os mapas de risco integrado indicam que as classes mais elevadas de risco concentram-se nas proximidades das rodovias e nas áreas classificadas como Formações Campestres, independentemente da estação analisada. Ao comparar os resultados dentro de cada estação específica, observa-se que essas classes permanecem como as mais expressivas. Esse padrão revela uma concordância espacial com as áreas historicamente mais suscetíveis à ocorrência de incêndios na Serra da Canastra.

Para avançar na análise e subsidiar a seleção das áreas destinadas à extração das cicatrizes de incêndio para a avaliação da vulnerabilidade, procedeu-se à comparação entre os mapas de risco integrado, referentes às diferentes estações, e os focos de incêndio disponibilizados pela plataforma FIRMS/NASA, a partir do satélite *MODIS, Collection 6.1*, considerando o período de 2020 a 2024. Os resultados são apresentados na Figura 24 e 25.

Figura 24 - Sobreposição dos Focos de calor sobre o mapa de risco integrado de incêndios Florestais da Serra da Canastra

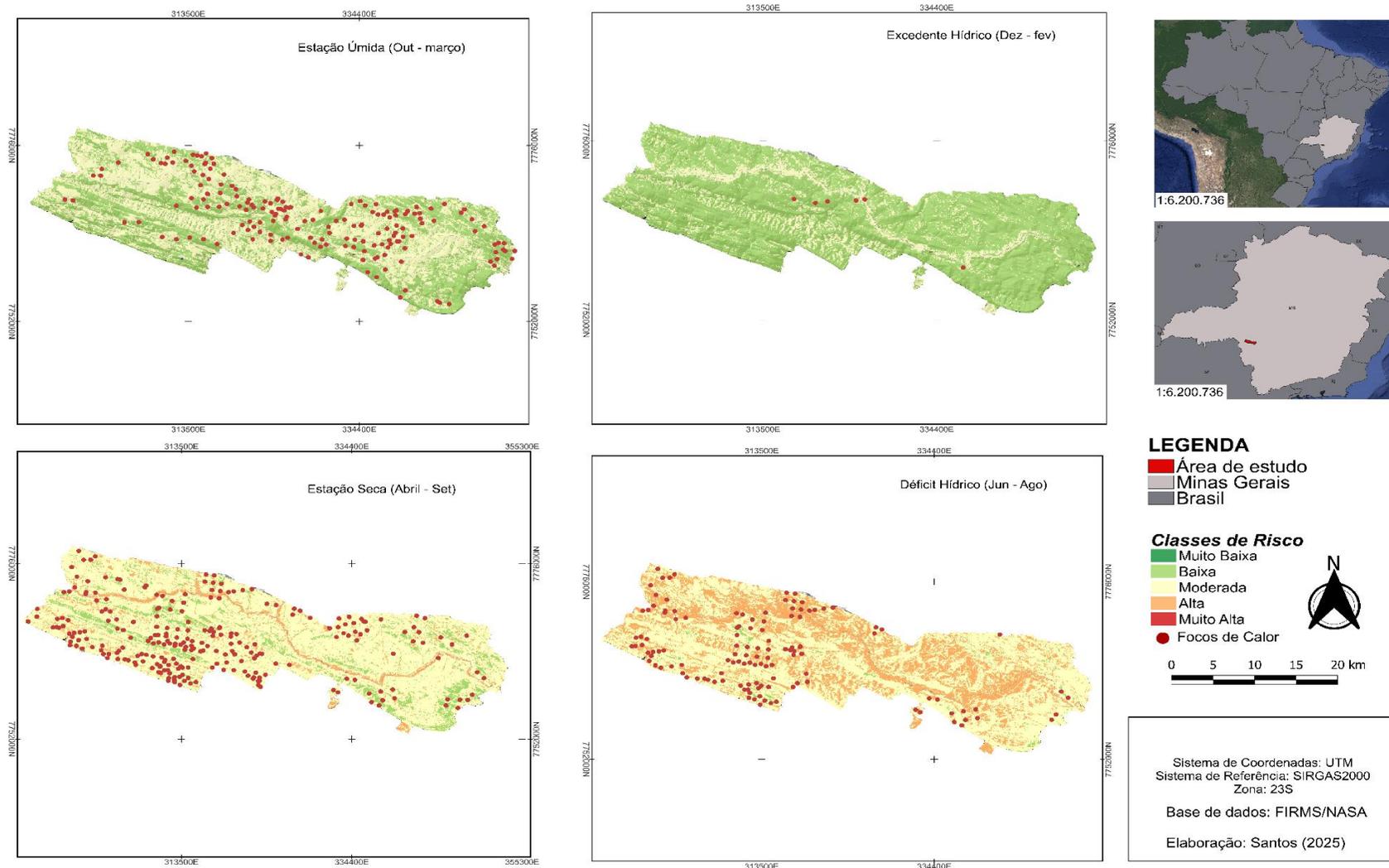
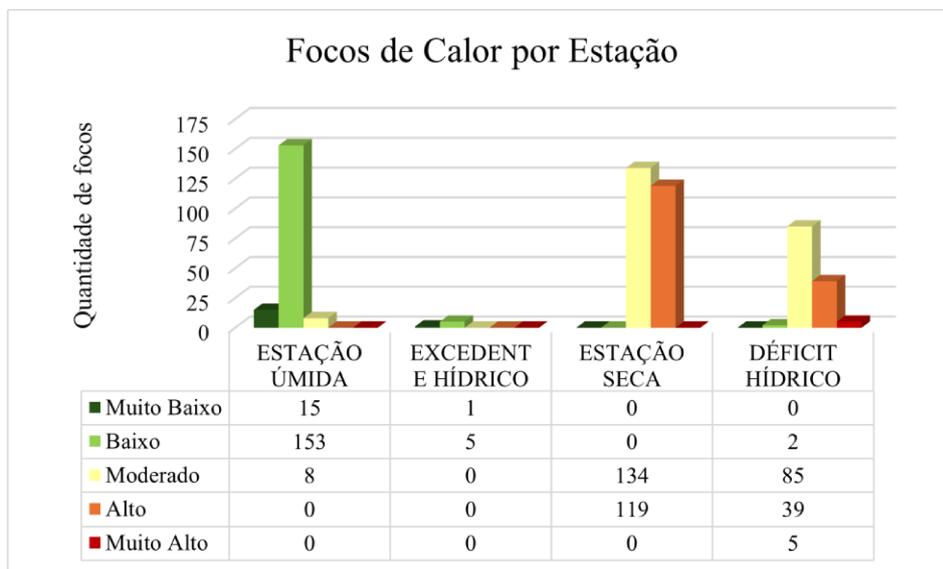


Figura 25 - Gráfico da distribuição dos focos de calor por classe de risco integrado de incêndio



Fonte: FIRMS/NASA (2020 - 2024)

Org: Santos (2025)

Durante a estação úmida, foram contabilizados 153 focos na classe de risco Baixa e 15 focos na classe Muito Baixa. Ao considerar especificamente o período de excedente hídrico, o padrão espacial mantém-se, embora com redução no número de ocorrências, totalizando 5 focos na classe Baixa e 1 focos na classe Muito Baixa.

Na estação seca, foram identificados 119 focos na classe Alta e 134 focos na classe Moderada. Considerando o período de déficit hídrico, existe uma maior distribuição dos focos pelas classes, na classe Moderada foram contabilizados 85 focos, 39 focos na classe Alta, 5 na Muito Alta, e 2 na classe Baixa.

A distribuição espacial dos focos de incêndio entre as estações apresenta padrões distintos. Durante o verão, os focos concentram-se principalmente entre o Chapadão do Zagaia e o Chapadão do Diamante, áreas caracterizadas por formações campestres. Essas áreas correspondem a setores que, de acordo com o mapa de risco estrutural, apresentam elevada suscetibilidade à ocorrência de incêndios. São áreas com a predominância de declividades inferiores a 10%, fator classificado com Muito Baixo, com certa proximidade com rodovias e infraestruturas, fator classificado como de risco muito alto. A variabilidade das vertentes, que se distribuem entre classes de risco alta e baixa. Além disso, a altitude nessas áreas varia entre 1.200 e 1.400 m.

No inverno, os focos concentram-se próximo à Serra da Sete Voltas, e os demais apresentam de forma distribuída sobre a área de estudo, os focos quase não se sobrepõem entre as estações.

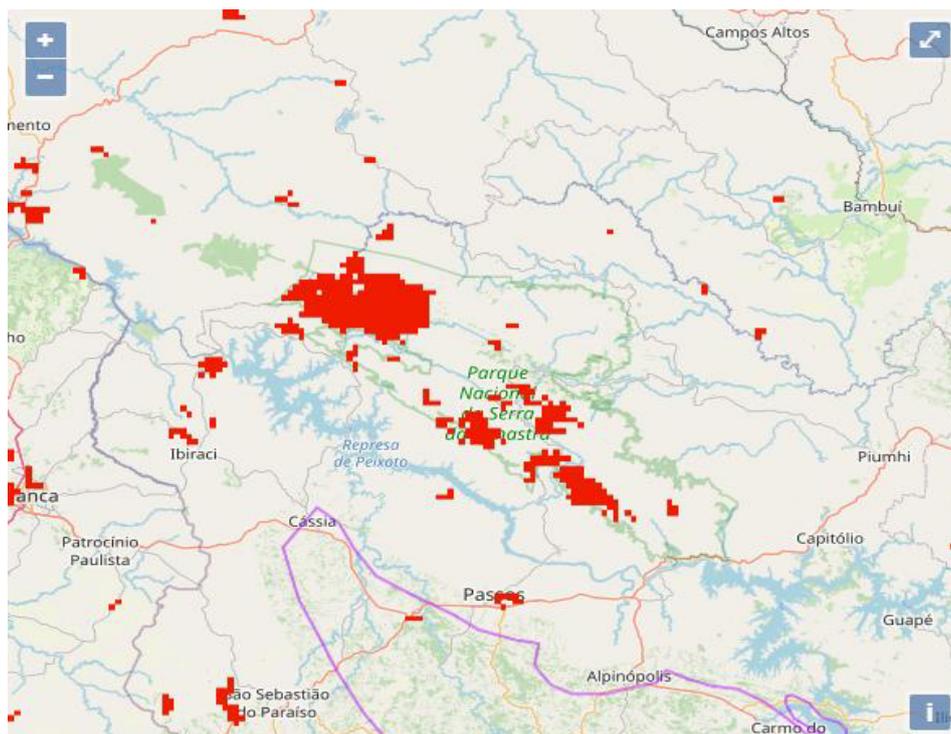
5.5 Quantificação da severidade das queimas

A severidade envolve a avaliação dos danos resultantes do processo, neste caso, dos incêndios florestais (Lourenço e Almeida, 2018). Esses eventos podem ser detectados por meio de dados de sensoriamento remoto obtidos por satélites, a partir da identificação de focos de calor na superfície terrestre (Teobaldo e Baptista, 2015).

As áreas afetadas pelo fogo apresentam respostas espectrais específicas, que podem ser identificadas por meio de índices espectrais utilizados para avaliar o grau de severidade das queimadas, tais como o *Normalized Burn Ratio* (NBR), proposto por Key e Benson (2006), o *differenced Normalized Burn Ratio* (dNBR), apresentado por Roy et al. (2006), e o *Relative differenced Normalized Burn Ratio* (RdNBR), desenvolvido por Miller e Thode (2007).

As imagens selecionadas correspondem aos dias 12 e 27 de agosto de 2020. Entre os cinco anos analisados, observa-se um pico na frequência de focos de incêndio entre os dias 16 e 19 de agosto de 2020, período que, quando comparado às cicatrizes de queimadas disponibilizadas pelo INPE (Figura 26), corresponde à cicatriz de maior extensão registrada na área de estudo.

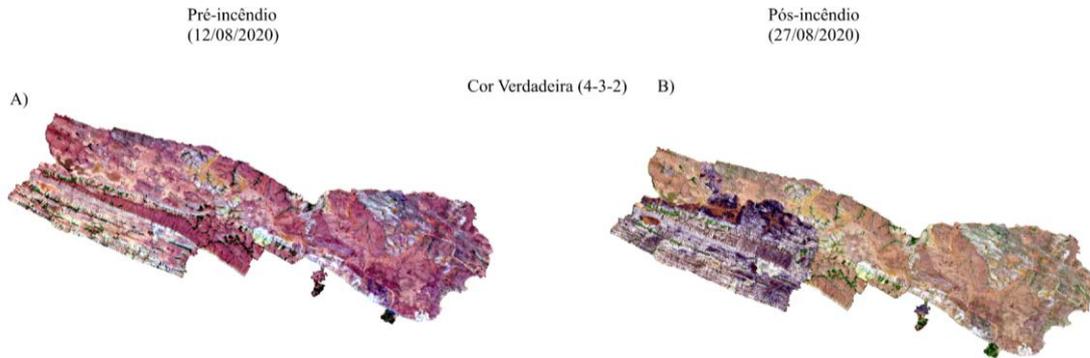
Figura 26 - Mapa de área queimada em agosto de 2020



Fonte: INPE (2020)

A Figura 27 apresenta a composição em cor verdadeira (bandas 4–3–2) das datas pré-incêndio e pós-incêndio, bem como a comparação com os respectivos valores do índice NBR para os mesmos períodos.

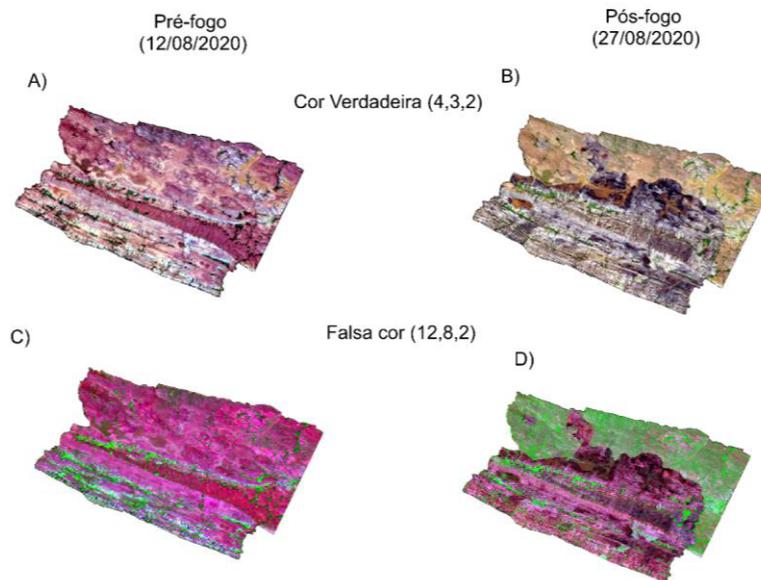
Figura 27 - Combinação colorida para visualização de cicatrizes de queimadas



Na imagem gerada a partir da composição em cores verdadeiras (Figura B), observa-se a formação de uma mancha que coincide com a cicatriz de incêndio identificada na imagem disponibilizada pelo INPE. Além disso, o restante da área apresenta tonalidades mais claras, com predominância de tons bege, quando comparada à Figura 19-A. Essa diferença pode estar associada ao fato de a Figura 19-B corresponde ao auge da estação seca, período em que a vegetação apresenta menor vigor e maior exposição do solo.

A Figura 28 apresenta a comparação entre as composições de cor verdadeira e falsa cor diretamente sobre a área de cicatriz de incêndio.

Figura 28 - Comparação entre as composições de bandas



A composição em falsa cor utiliza bandas do infravermelho para realçar características pouco perceptíveis ao olho humano, o que resulta em um contraste mais acentuado e favorece a identificação das áreas queimadas (Ardila et al., 2023).

Nas Figuras C e D, correspondentes aos períodos pré e pós-fogo, respectivamente, é possível observar a distinção entre a área afetada pelo incêndio e os demais elementos que compõem a cena. Enquanto a cicatriz de incêndio apresenta tonalidades de magenta mais intensas, a vegetação remanescente exibe comportamento espectral oposto ao das áreas queimadas, evidenciando o efeito do fogo sobre a cobertura vegetal.

Para a mensuração da severidade do incêndio, é necessário realizar a diferenciação entre imagens, procedimento que consiste na subtração do NBR do período pré-fogo pelo NBR do período pós-fogo. A partir desse processo, valores positivos indicam maior severidade da queimada, enquanto valores próximos de zero representam áreas sem alterações significativas (Key e Benson, 2006).

Na área de estudo, os valores do índice variaram entre $-0,7$, os quais, de acordo com a classificação proposta por Key e Benson (2006), indicam áreas com crescimento ou regeneração da vegetação, e $1,26$, correspondendo a áreas afetadas por incêndios de alta severidade. A Figura 29 apresenta os níveis de severidade do incêndio, enquanto a Tabela 17 mostra a distribuição das áreas por classe e o Figura 30 representa a respectiva porcentagem

Figura 29 - Mapa de severidade do incêndio

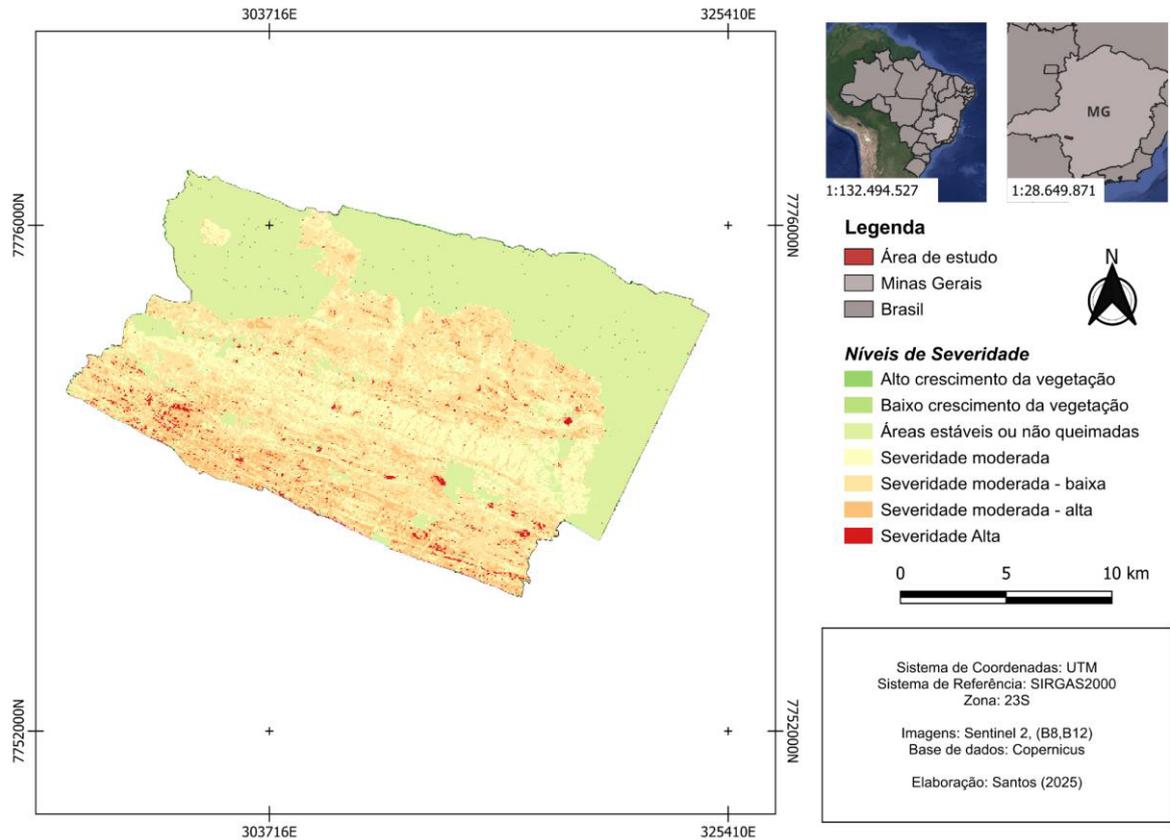
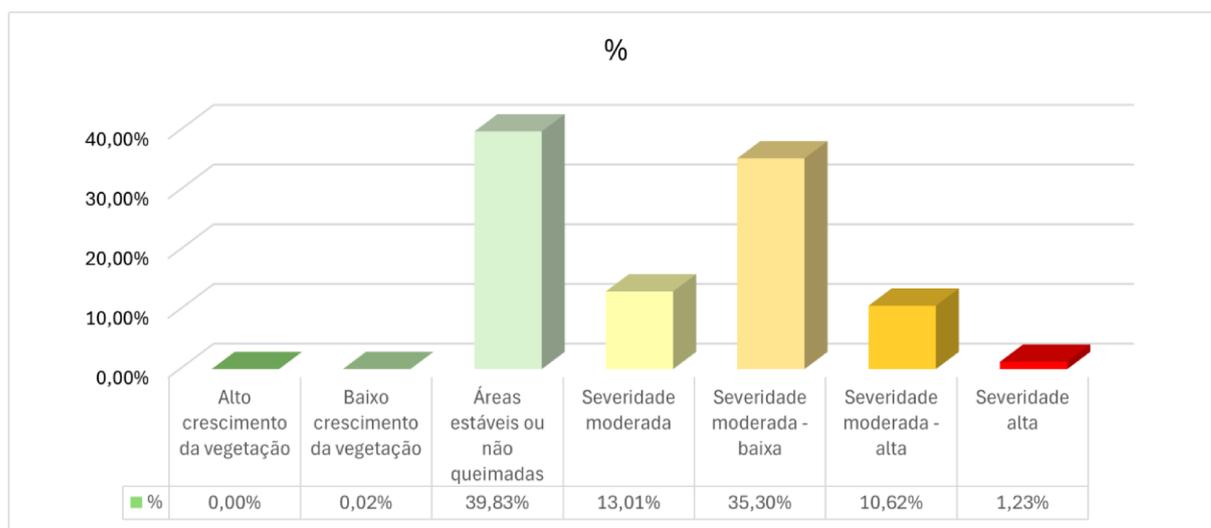


Tabela 17 - Distribuição da área pelos níveis de severidade

Níveis de severidade	Área (km ²)	%
Alto crescimento da vegetação	0,012	0,00%
Baixo crescimento da vegetação	0,058	0,02%
Áreas estáveis ou não queimadas	139,09	39,83%
Severidade moderada	45,43	13,01%
Severidade moderada - baixa	123,27	35,30%
Severidade moderada - alta	37,09	10,62%
Severidade alta	4,28	1,23%
TOTAL	349,25	100%

Org: Santos (2025)

Figura 30 - Gráfico da distribuição da área pelos níveis de severidade em %



Org: Santos (2025)

É importante ressaltar que a cicatriz de incêndio foi mensurada durante o auge da estação seca na Serra da Canastra, e que a sazonalidade exerce forte influência sobre os índices espectrais utilizados e, conseqüentemente, sobre a classificação dos níveis de severidade do incêndio (Pinto et al., 2025).

A distribuição das áreas associadas à cicatriz de incêndio concentra-se, predominantemente, na classe Áreas estáveis ou não queimadas ($-0,1 \pm 0,099$), que corresponde a 39,83% da área total. Na Figura, observa-se que essa classe se localiza principalmente nas proximidades do Chapadão do Zagaia. Em seguida, destaca-se a classe Severidade moderada–baixa ($0,27 \pm 0,439$), que representa 35,30% da área, distribuída sobretudo nas imediações da Serra das Sete Voltas e no início do Chapadão do Zagaia.

A classe Severidade moderada, correspondente a 13,01% da área, concentra-se principalmente em setores de fundo de vale. De acordo com Ardila et al. (2023), em ambientes com vegetação mais densa, o índice dNBR tende a indicar severidade moderada a alta, em função da redução da reflectância após o fogo, associada à elevada biomassa consumida pelo incêndio.

A classe Severidade alta ($0,440 \pm 0,659$) corresponde a 1,23% da área total. Na Figura que representa os níveis de severidade, essa classe apresenta-se de forma relativamente bem distribuída na área de estudo. Segundo Teobaldo e Baptista (2025), no bioma Cerrado, os níveis mais elevados de severidade tendem a ocorrer em áreas de campo sujo e campo limpo, especialmente durante a estação seca. A Tabela 18 apresenta a relação entre os níveis de severidade e as classes de risco.

Tabela 18 - Relação entre a severidade e a suscetibilidade pela distribuição da área (km²)

	Muito Baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
Alto Cresc.	0	0	0,12	0,00004	0
Baixo Cresc.	0	0,002	0,048	0,007	0
Áreas estáveis ou não queimadas	0	0,59	71,70	63,20	0
Moderada	0	0,91	0,032	11,59	0
Moderada – baixa	0	3,34	87,16	31,97	0
Moderada – alta	0	1,14	26,26	9,16	0
Alta	0	0,086	2,66	1,48	0

Org: Santos (2026)

Em todos os níveis de severidade observa-se a predominância da classe de risco Moderada. Ressalta-se que o mapa de risco utilizado corresponde ao risco integrado do período de déficit hídrico, no qual as classes de risco Muito Baixa e Muito Alta não apresentaram áreas representativas, sugerindo baixa variabilidade extrema do risco durante o período seco, com a paisagem concentrando-se em condições intermediárias a elevadas de risco.

As áreas classificadas como estáveis ou não queimadas também apresentam esse padrão, com incidência sobre a classe de risco Moderada e Alta. Esses valores indicam que mesmo com ausência de focos de calor, grande parte da área permanece sob condições ambientais propícias à ocorrência de incêndios. A Tabela 19 apresenta a distribuição pelas classes de risco em porcentagem.

Tabela 19 - Distribuição da classe de risco pela área em %

Classe de Risco	Área (km ²)	%
Muito Baixa	0	0,00
Baixa	6,09	1,77
Moderada	220,43	64,09
Alta	117,43	34,14
Muito Alta	0	0,00

Org: Santos (2026)

A classe Moderada corresponde a 64,09% da área total, evidenciando seu papel central na dinâmica espacial do risco de incêndios. Em seguida, a classe Alta representa 34,14%, o que indica uma parcela significativa da área sob condições potencialmente críticas. Por outro lado,

a classe Baixa apresenta participação reduzida (1,77%), enquanto as classes Muito Baixa e Muito Alta não registram ocorrência.

CAPÍTULO VI



6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para Christofolletti (1999), o modelo consiste em uma estruturação simplificada da realidade, que busca representar de forma generalizada, as principais características e relações dos fenômenos analisados. Trata-se, portanto, de uma aproximação conceitual, marcada por certo grau de subjetividade, uma vez que não incorpora a totalidade das observações ou medidas associadas ao sistema real.

Nesse sentido, a modelagem pode ser compreendida como um instrumento metodológico no âmbito da pesquisa científica, integrando um conjunto de procedimentos destinados a organizar, interpretar e explicar a complexidade dos processos naturais.

A modelagem para o diagnóstico de risco pode ser realizada a partir da integração de diversas variáveis, as quais apresentam diferentes graus de relevância no processo analítico. No presente estudo, as variáveis selecionadas mostraram-se adequadas e representativas, contribuindo de forma consistente para a caracterização espacial do risco.

O mapa de risco estrutural evidenciou que as classes mais elevadas de risco, variando de Moderada a Alta, concentram-se predominantemente nas formações campestres e savânicas, em áreas com declividades suaves a moderadas (inferiores a 10% indo a 20%) e em vertentes com orientação voltada para o Norte, Nordeste e Noroeste.

Os resultados indicam a existência de diferenças significativas entre as classes de risco ao longo das distintas estações do ano, evidenciando um comportamento sazonal bem definido. Observa-se que as classes de risco e de suscetibilidade tendem a se intensificar nos períodos mais secos, padrão identificado na literatura para o bioma Cerrado, em função da redução da umidade, do acúmulo de material combustível e do aumento da probabilidade de ignição.

A análise das quatro estações consideradas permitiu identificar que as vias de acesso e as infraestruturas do parque configuram-se como áreas particularmente relevantes nas classes mais elevadas de risco, reforçando a influência antrópica como fator indutor de incêndios. Em contrapartida, considerando que a Serra da Canastra é caracterizada por extensas chapadas e que as maiores declividades concentram-se nas vertentes escarpadas da serra, frequentemente associadas a afloramentos rochosos, observou-se que as classes de risco apresentaram baixa representatividade em áreas com declividades superiores a 50%.

A sobreposição dos focos de incêndio às classes de risco indica que a classe Moderada apresenta a maior frequência de ocorrências, seguida pela classe Alta, que também se mostra expressiva. Durante a estação úmida, observa-se uma mudança nesse comportamento, com a maior frequência de focos incidindo sobre áreas classificadas como Baixa, seguidas pela classe

Moderada. Ressalta-se que, no período denominado Excedente Hídrico, compreendido entre os meses de dezembro e fevereiro, foram registrados poucos focos de calor, concentrados majoritariamente em áreas de risco Baixo.

Assim como a modelagem em uma perspectiva integrada, o sensoriamento remoto constitui uma ferramenta fundamental no âmbito da Geografia Física. Neste trabalho, sua aplicação foi principalmente para a análise da severidade dos incêndios. A utilização de composições de bandas e de índices espectrais forneceu subsídios consistentes para a caracterização espacial dos impactos do fogo, permitindo uma leitura detalhada da heterogeneidade intra-área dos eventos analisados.

O cálculo do dNBR evidenciou que, no recorte correspondente à cicatriz de incêndio, estabeleceu-se um mosaico com distintos níveis de severidade, apresentando distribuições espaciais contrastantes. Os resultados indicam a predominância de áreas estáveis ou não queimadas, que correspondem a 39,83% da área analisada, seguidas pela classe de Severidade Moderada-Baixa, com 35,30%. As áreas associadas aos níveis mais elevados de severidade coincidem espacialmente com setores onde há maior concentração de focos sobrepostos ao mapa de risco, destacando-se regiões próximas à Serra das Sete Voltas e ao início do Chapadão do Zagaia.

Ao comparar o mapa de severidade dos incêndios com o mapa de risco, os resultados demonstram que a área de estudo é caracterizada predominantemente por condições de risco Moderado a Alto, amplamente distribuídas no espaço.

A metodologia proposta apresenta bom desempenho na avaliação do risco estrutural, sobretudo ao considerar que a área de estudo possui grande extensão espacial e que foram utilizados bancos de dados de qualidade satisfatória. Embora esses dados apresentem resolução espacial de 30 m, tal nível de detalhamento mostrou-se adequado para a análise em escala regional, permitindo a identificação consistente dos padrões espaciais de risco.

Por outro lado, a modelagem do risco dinâmico configura-se como um desafio metodológico mais complexo, uma vez que demanda atualizações frequentes das variáveis envolvidas. Observa-se uma limitação relacionada à disponibilidade e à continuidade temporal desse tipo de dados. No caso das imagens de satélite, determinados períodos do ano dificultam a obtenção de dados adequados, seja pela maior cobertura de nuvens, seja por restrições na frequência de aquisição ou na qualidade radiométrica das imagens.

Trata-se de uma metodologia consistente, entretanto, sua aplicação em outras áreas de estudo requer a devida consideração das características ambientais e territoriais específicas, bem como a criteriosa seleção das variáveis de influência a serem incorporadas em pesquisas

futuras. Essa adequação é fundamental para assegurar que a modelagem represente de forma fiel a dinâmica local dos processos analisados, respeitando as particularidades de cada área de estudo.

A partir dos mapas elaborados, com as informações apresentadas torna-se possível identificar, de forma espacialmente, as regiões da UC que apresentam maior suscetibilidade ao fogo ao longo dos diferentes períodos do ano. Esses resultados fornecem subsídios relevantes para a gestão ambiental e o planejamento territorial, permitindo a proposição de medidas preventivas mais eficazes, tais como a alocação estratégica de recursos, o direcionamento de ações de monitoramento e o planejamento antecipado das operações de combate durante o período de estiagem.

REFERÊNCIAS

ABATZOGLOU, J. T.; WILLIAMS, A. P. Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Madison, WI, v. 113, n. 42, p. 11770-11775, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1607171113>.

AB'SÁBER, A. N. Províncias geológicas e domínios morfoclimáticos no Brasil. **Geomorfologia**, [São Paulo, SP], n. 20, p. 1-26, 1970. Disponível em: https://biblio.fflch.usp.br/AbSaber_AN_1348920_ProvinciasGeologicas.pdf.

ALLGÖWER, B.; CARLSON, J. D.; VAN WAGTENDONK, J. W. Introduction to Fire Danger Rating and Remote Sensing: will Remote Sensing enhance Wildland Fire Danger Rating? *In: Wildland Fire Danger Estimation and Mapping: the role of Remote Sensing data*. Singapore: World Scientific Publishing, 2003. p. 1-19.

ALLOZA, J. A.; BAEZA, M. J.; DE LA RIVA, J.; DUGUY, B.; ECHEVERRÍA, M. T.; IBARRA, P.; LLOVET, J.; PÉREZ-CABELLO, F.; ROVIRA, P.; VALLEJO, V. R. A model to evaluate the ecological vulnerability to forest fires in Mediterranean ecosystems. **Forest Ecology and Management**, Zaragoza, Espanha, v. 234, p. S203, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.322>.

ANDREWS, P. L.; WILLIAMS, J. T. Fire potential evaluation in support of prescribed fire risk assessment. *In: PRUDEN, T. L.; BRENNAN, L. A. (ed.). Proceedings 20th Tall Timbers Fire Ecology Conference: fire in ecosystem management: shifting the paradigm from suppression to prescription*. Tallahassee: Tall Timbers Research, 1998. p. 64-68.

BARRADAS, A. C. S.; RIBEIRO, K. T. Integrated Fire Management: Serra Geral do Tocantins Ecological Station's Journey (2001 to 2020). **Biodiversidade Brasileira**, Brasília, DF, v. 11, n. 2, p. 139-152, 2021. DOI: <https://doi.org/10.37002/biobrasil.v11i2.1739>.

BASTOS, L. A.; FERREIRA, I. M. COMPOSIÇÕES FITOFISIONÔMICAS DO BIOMA CERRADO: estudo sobre o subsistema de Vereda. **Espaço em Revista**, Catalão, v. 12, n. 1, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5216/er.v12i1.17656>.

BATISTA, E. K. L.; FIGUEIRA, J. E. C.; RODRIGUES, E. L.; GARCÍA-CALVO, R. P.; FERNANDES, G. W. A. **Escrito nas cinzas**: lições aprendidas no Cerrado brasileiro e no Chaparral californiano. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.

BENTO-GONÇALVES, A. Os (grandes) incêndios florestais históricos em Portugal continental. **Cadernos de Geografia**, Coimbra, n. 50, p. 67-79, 2024. DOI: https://doi.org/10.14195/0871-1623_50_5.

BENTO-GONÇALVES, A. Wildfires in the Anthropocene. *In: MENDES, J.; PONCE DE LEÃO, I.; BERTOLAMI, O.; MENDES, M. C.; MENDES, R. P.; GONÇALVES, C. D. (coord.). GREEN MARBLE 2022: Estudos sobre o Antropoceno e Ecocrítica / Studies on the Anthropocene and Ecocriticism*. [S. l.]: INFAST (Institute for Anthropocene Studies), 2022. p. 13-22.

BENTO-GONÇALVES, A.; ÚBEDA, X.; MARTIN, D. Fire and soils: Key concepts and recent advances. **Geoderma**, v. 191, p. 3-13, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.004>.

BENTO-GONÇALVES, A.; VIEIRA, A.; NUNES, A.; LOURENÇO, L.; OLIVEIRA, S.; FÉLIX, F. Análise de vulnerabilidade a incêndios florestais na região do Minho, Portugal. *In: Multidimensão e territórios de risco*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2014a. p. 721-725. DOI: https://doi.org/10.14195/978-989-96253-3-4_126.

BENTO-GONÇALVES, A.; VIEIRA, A.; NUNES, A.; LOURENÇO, L.; OLIVEIRA, S.; FÉLIX, F. Análise de vulnerabilidade a incêndios florestais na região do Minho, Portugal. *In: Multidimensão e territórios de risco*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2014b. p. 721-725. DOI: https://doi.org/10.14195/978-989-96253-3-4_126.

BERLINCK, C. N.; BATISTA, E. K. L. Good fire, bad fire: It depends on who burns. **Flora**, v. 268, 151610, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151610>.

BERLINCK, C. N.; LIMA, L. H. A. Implementação do Manejo Integrado do Fogo em Unidades de Conservação Federais no Brasil: Resultados e Perspectivas. **Biodiversidade Brasileira**, Brasília, v. 11, n. 2, p. 128-138, 2021. DOI: <https://doi.org/10.37002/biobrasil.v11i2.1709>.

BERWIG, J. A.; ENGELMANN, W. O princípio da precaução: diretrizes para sua aplicação empírica. **Pensar - Revista de Ciências Jurídicas**, Ceará, v. 28, p. 1-14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5020/2317-2150.2023.13019>.

BONAZOUNTAS, M.; KALLIDROMITOU, D.; KASSOMENOS, P. A.; PASSAS, N. Forest Fire Risk Analysis. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v. 11, p. 617-626, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1080/10807030590949717>.

BOND, W. J.; WOODWARD, F. I.; MIDGLEY, G. F. The global distribution of ecosystems in a world without fire. **New Phytologist**, v. 165, p. 525-538, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01252.x>.

BONTEMPO, G. C.; LIMA, G. S.; RIBEIRO, G. A.; DOULA, S. M.; JACOVINE, L. A. G. Registro de ocorrência de incêndio (ROI): evolução, desafios e recomendações. **Biodiversidade Brasileira**, Brasília, v. 1, p. 247-263, 2011. DOI: <https://doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v1i2.108>.

BORGES, K. M. R.; FILHO, J. C. O.; COAN, G. P. de O.; VASCONCELOS, T. M. M. Sensoriamento remoto e Geoprocessamento como subsídio ao manejo do fogo e ao combate aos incêndios florestais em Unidades de Conservação Federais. **Biodiversidade Brasileira**, Brasília, v. 11, p. 168-178, 2021. DOI: <https://doi.org/10.37002/biobrasil.v11i2.1685>.

BOUBETA, M.; LOMBARDÍA, M. J.; MAREY-PÉREZ, M. F.; MORALES, D. Prediction of forest fires occurrences with area-level Poisson mixed models. **Journal of Environmental Management**, v. 154, p. 151-158, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.02.009>.

BOWMAN, D. M. J. S.; BALCH, J. K. ; ARTAXO, P.; BOND, W. J. ; CARLSON, J. M.; COCHRANE, M. A. ; D'ANTONIO, C. M.; DEFRIES, R. S.; DOYLE, J. C.; HARRISON, S. P.; JOHNSTON, F. H.; KEELEY, J. E.; KRAWCHUK, M. A. ; KULL, C. A. ; MARSTON, J. B. ; MORITZ, M. A. ; PRENTICE, I. C.; ROOS, C. I.; SCOTT, A. C.; SWETNAM, T. W.;

VAN DER WERF, G. R.; PYNE, S. J. Fire in the Earth system. **Science**, [S. l.], v. 324, p. 481-484, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1163886>.

BOWMAN, D. M. J. S.; BALCH, J. K.; ARTAXO, P.; BOND, W. J.; COCHRANE, M. A.; D'ANTONIO, C. M.; ET AL. The human dimension of fire regimes on Earth. **Journal of Biogeography**, v. 38, n. 12, p. 2223-2236, 2011. DOI: 10.1111/j.1365-2699.2011.02595.x.

BOWMAN, D. M. J. S.; KOLDEN, C. A.; ABATZOGLOU, J. T.; JOHNSTON, F. H.; VAN DER WERF, G. R.; FLANNIGAN, M. Vegetation fires in the Anthropocene. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, p. 500-515, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0085-3>.

BRASIL. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. *Agritempo: sistema de monitoramento agrometeorológico – pesquisa por estado (Minas Gerais)*. Brasília: Embrapa Agricultura Digital, s.d. Disponível em: <https://www.agritempo.gov.br/br/estado/MG/pesquisa/>

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente; Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Plano de Manejo Integrado do Fogo do Parque Nacional da Serra da Canastra: 2023-2026**. Brasília: MMA/ICMBio, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/planos-de-manejo-integrado-do-fogo/PMIF_PARNA_SERRA_CANAstra_2023_2026.pdf.

CARVALHO, M. C. **Mapeamento de vulnerabilidade de incêndios florestais no Parque Nacional de Brasília**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Formação de Oficiais) - Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal, Brasília, 2021.

CASSINO, R. F.; LEDRU, M.-P.; SANTOS, R. de A.; FAVIER, C. Vegetation and fire variability in the central Cerrados (Brazil) during the Pleistocene-Holocene transition was influenced by oscillations in the SASM boundary belt. **Quaternary Science Reviews**, v. 232, 106209, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106209>.

CASTILLO S, M.; PLAZA V, Á.; GARFIAS S, R. A recent review of fire behavior and fire effects on native vegetation in Central Chile. **Global Ecology and Conservation**, v. 24, e01210, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01210>.

CHAVES, M. L. de S. C.; ANDRADE, K. W.; BENITEZ, L.; BRANDÃO, P. R. G. PROVÍNCIA DIAMANTÍFERA DA SERRA DA CANASTRA E O KIMBERLITO CANASTRA-1: PRIMEIRA FONTE PRIMÁRIA DE DIAMANTES ECONOMICAMENTE VIÁVEL DO PAÍS. **Geociências**, v. 27, p. 299-317, 2008.

CHICAS, S. D.; ØSTERGAARD NIELSEN, J. Who are the actors and what are the factors that are used in models to map forest fire susceptibility? A systematic review. **Natural Hazards**, v. 114, p. 2417-2434, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05495-5>.

COCHRANE, M. A.; RYAN, K. C. Fire and fire ecology: Concepts and principles. *In: Tropical Fire Ecology*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 25-62. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-77381-8_2.

CONFESSOR, J. **Dinâmica hidrogeomorfológica de vertentes do Chapadão do Diamante - Serra da Canastra - MG**. 2023. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2023.70>.

COUTINHO, L. M. **Biomass Brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

COUTINHO, L. M. **Contribuição ao conhecimento do papel ecológico das queimadas na floração de espécies do Cerrado**. 1976. Tese (Livre-Docência) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.41.2014.tde-04092014-095647>.

CRAWFORD-BROWN, D. J. **Risk Modeling: Mathematical Methods of Environmental Risk Modeling**. New York: Springer Science+Business Media, 2001. DOI: 10.1007/978-1-4757-3271-9. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-1-4757-3271-9.pdf>.

DA SILVA ARRUDA, V. L.; ALENCAR, A. A. C.; DE CARVALHO JÚNIOR, O. A.; DE FIGUEIREDO RIBEIRO, F.; DE ARRUDA, F. V.; CONCIANI, D. E.; DA SILVA, W. V.; SHIMBO, J. Z. Assessing four decades of fire behavior dynamics in the Cerrado biome (1985 to 2022). **Fire Ecology**, v. 20, 64, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42408-024-00298-4>.

DAS, J.; MAHATO, S.; JOSHI, P. K.; LIOU, Y.-A. Forest Fire Susceptibility Zonation in Eastern India Using Statistical and Weighted Modelling Approaches. **Remote Sensing**, v. 15, 1340, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15051340>.

DIAS, B. **Proposta para mapeamento dos riscos de queimadas e incêndios em Minas Gerais**. 2023. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2023.8066>.

DUDLEY, N.; STOLTON, S. **Defining protected areas: an international conference in Almeria, Spain, May 2007**. Gland: IUCN, 2008.

DUPIRE, S.; CURT, T.; BIGOT, S.; FRÉJAVILLE, T. Vulnerability of forest ecosystems to fire in the French Alps. **European Journal of Forest Research**, v. 138, p. 813-830, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-019-01206-1>.

DURLEVIĆ, U.; NOVKOVIĆ, I.; LUKIĆ, T.; VALJAREVIĆ, A.; SAMARDŽIĆ, I.; KRSTIĆ, F.; BATOČANIN, N.; MIJATOV, M.; ĆURIĆ, V. Multihazard susceptibility assessment: A case study – Municipality of Štrpce (Southern Serbia). **Open Geosciences**, [S. l.], v. 13, p. 1414-1431, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0314>.

EL ASMAR, R.; LI, Z.; TANNER, D. J.; HU, Y.; O'NEILL, S.; HUEY, L. G.; ODMAN, M. T.; WEBER, R. J. A multi-site passive approach to studying the emissions and evolution of smoke from prescribed fires. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 24, p. 12749-12773, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-24-12749-2024>.

EVENDEN, F. G. Review of Wilderness and the American Mind. **The Journal of Wildlife Management**, Nashville, TN, v. 32, p. 991-991, 1968. DOI: <https://doi.org/10.2307/3799586>.

EUROPEAN UNION, **Copernicus Programme**. *Sentinel-2 L2A – Surface Reflectance* — coordenadas aproximadas (lat -20.21774; lon -46.38977). Copernicus Data Space Browser. Disponível em: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>

FELGUEIRAS, J. J. da S. **Evolução do risco de incêndio florestal**. 2005. Dissertação (Mestrado em Gestão de Riscos Naturais) – Universidade do Porto, Porto, 2005. DOI: <https://doi.org/10.34626/z93t-6443>.

FÉLIX, A. C. T.; FONTGALLAND, I. L. Áreas protegidas no Brasil e no mundo: quadro geral de sua implementação. **Research, Society and Development**, São Paulo, v. 10, n. 12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.19970>.

FERNANDES, L. C. **Modelagem de risco de incêndios florestais utilizando redes neurais artificiais aplicada às regiões metropolitanas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/items/1cc3d47e-cde9-41fd-a352-8fd90d07f918>.

FERNANDES, L. C.; NERO, M. A.; TEMBA, P.; SOARES FILHO, B. S. Modelagem de risco de incêndios florestais: uma visão geral = Forest fire risk modeling: a overview. *In: INTERNATIONAL SODEBRAS CONGRESS*, 38., 2018, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Sodebras, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/04e932bc-3478-463d-887b-3bd8e782b750/content>.

FERNANDES, M. do C.; COURA, P. H. F.; SOUSA, G. M. de; AVELAR, A. de S. Avaliação Geocológica de Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios no Estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 18, p. 299-309, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4322/floram.2011.050>.

FERNANDES, N. F. Modelagem em Geografia Física: Teoria, Potencialidades e Desafios. **Espaço Aberto**, Rio de Janeiro, v. 6, p. 209-247, 2016. DOI: <https://doi.org/10.36403/espacoaberto.2016.5243>.

FIDALGO, A.; FERNANDES, A. S. Efeito dos incêndios florestais no ecossistema: revisão integrativa. **Territorium**, Portugal, p. 5-13, 2023. DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_30-2_1.

FIDELIS, A.; ALVARADO, S. T.; BARRADAS, A. C. S.; PIVELLO, V. R. The Year 2017: Megafires and Management in the Cerrado. **Fire**, v. 1, n. 3, 49, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire1030049>.

FONSECA, E. **Erosão de solo em ambiente amazônico**: aplicações de modelagens preditivas. Curitiba: Editora CRV, 2024. DOI: 10.24824/9782515948.5.

FRANCO, J. B. S. O PAPEL DA EMBRAPA NAS TRANSFORMAÇÕES DO CERRADO. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, MG v. 2, n. 3, p. 31-40, 2001. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG2315258>.

FRANCO, J. L. de A.; SCHITTINI, G. de M.; BRAZ, V. da S. História da conservação da natureza e das áreas protegidas: panorama geral. **Historiæ**, Rio Grande do Sul, v. 6, p. 233-270, 2015.

FREIRE, S.; CARRÃO, H.; CAETANO, M. R. **Produção de cartografia de risco de incêndio florestal com recurso a imagens de satélite e dados auxiliares**. Lisboa: Instituto Geográfico Português (IGP), 2002. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/242754146>.

GHERMANDI, L.; GONZALES, S.; ALCASENA, F.; BENTO-GONÇALVES, A.; MARTÍNEZ, J. Editorial: Wildfires in the wildland-urban interface: applied research for fire

prevention and hazard reduction. **Frontiers in Environmental Science**, v. 12, 2024. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1417773.

GOLDAMMER, J. Thirty years international wildland fire conferences: review and achievements of a circumglobal journey from Boston to Campo Grande. **Biodiversidade Brasileira**, Brasília, v. 11, n. 2, p. 6-52, 2021. DOI: <https://doi.org/10.37002/biobrasil.v11i2.1743>.

GOMES, L.; SIMÕES, S. J. C.; DALLA NORA, E. L.; DE SOUSA-NETO, E. R.; FORTI, M. C.; OMETTO, J. P. H. B. Agricultural Expansion in the Brazilian Cerrado: Increased Soil and Nutrient Losses and Decreased Agricultural Productivity. **Land**, v. 8, n. 1, 12, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/land8010012>.

HARDESTY, J.; MYERS, R.; FULKS, W. Fire, ecosystems and people: a preliminary assessment of fire as a global conservation issue. **The George Wright Forum**, v. 22, n. 4, p. 78-87, 2005. Disponível em: <https://www.georgewright.org/224hardesty.pdf>.

HAYKIN, S. **Redes Neurais: Princípios e Práticas**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002. 900 p. ISBN 8573077182. Call number: 006.32 H419r 2.ed. (BCP).

HE, T.; LAMONT, B. B.; PAUSAS, J. G. Fire as a key driver of Earth's biodiversity. **Biological Reviews**, v. 94, p. 1983-2010, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/brv.12544>.

HOFFMANN, W. A.; ORTHEN, B.; NASCIMENTO, P. K. V. do. Comparative fire ecology of tropical savanna and forest trees. **Functional Ecology**, v. 17, p. 720-726, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2003.00796.x>.

HOFMANN, G. S.; CARDOSO, M. F.; ALVES, R. J. V.; WEBER, E. J.; BARBOSA, A. A.; DE TOLEDO, P. M.; PONTUAL, F. B.; SALLES, L. de O.; HASENACK, H.; CORDEIRO, J. L. P.; AQUINO, F. E.; DE OLIVEIRA, L. F. B. The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. **Global Change Biology**, v. 27, p. 4060-4073, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15712>.

HOGAN, D. J.; MARANDONA JR., E. (org.). **População e mudança climática: dimensões humanas das mudanças ambientais globais**. Campinas: NEPO/UNICAMP; UNFPA, 2009. Disponível em: <https://www.nepo.unicamp.br/wp-content/uploads/2022/12/populacao-e-mudanca-climatica.pdf>.

JI, C.; YANG, H.; LI, X.; PEI, X.; LI, M.; YUAN, H.; CAO, Y.; CHEN, B.; QU, S.; ZHANG, N.; CHUN, L.; SHI, L.; SUN, F. Forest Wildfire Risk Assessment of Anning River Valley in Sichuan Province Based on Driving Factors with Multi-Source Data. **Forests**, [S. l.], v. 15, n. 9, 1523, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15091523>.

JÚNIOR, A. C. P. **Métodos de geoprocessamento na avaliação da susceptibilidade do Cerrado ao fogo**. 2002. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002. Disponível em: https://dataserver-coids.inpe.br/queimadas/queimadas/Publicacoes-Impacto/documentos/2002_PereiraJr_Metodos_Geoproc_doutorado_UFSC.pdf.

JÚNIOR, A. F. C.; SOUZA, V. V. de; JÚNIOR, O. A. de C.; MARTINS, É. de S.; SANTANA, O. A.; FREITAS, L. F.; GOMES, R. A. T. INTEGRAÇÃO DE PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS E IMAGEM ASTER PARA A DELIMITAÇÃO DAS

FITOFISIONOMIAS DA SERRA DA CANASTRA, PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA, MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 11, n. 1, 2010. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v11i1.142>.

JUNIOR, V. J. dos S.; PRADO, R. B.; LIMA, E. de P. MODELAGEM GEOECOLÓGICA DA SUSCETIBILIDADE AOS INCÊNDIOS NO PARQUE ESTADUAL DA LAPA GRANDE, MINAS GERAIS, BRASIL. **Nucleus**, v. 17, n. 1, p. 101-121, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3738/1982.2278.3767>.

KANTARCIOGLU, O.; KOCAMAN, S.; SCHINDLER, K. Artificial neural networks for assessing forest fire susceptibility in Türkiye. **Ecological Informatics**, v. 75, 102034, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102034>.

KEELEY, J. E. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. **International Journal of Wildland Fire**, v. 18, p. 116-126, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1071/WF07049>.

KELT, D. A.; SOLLMANN, R.; WHITE, A. M.; ROBERTS, S. L.; VUREN, D. H. V. Diversity of small mammals in the Sierra Nevada: filtering by natural selection or by anthropogenic activities? **Journal of Mammalogy**, v. 98, n. 1, p. 85-93, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyw158>.

KOPROSKI, L.; FERREIRA, M. P.; GOLDAMMER, J. G.; BATISTA, A. C. MODELO DE ZONEAMENTO DE RISCO DE INCÊNDIOS PARA UNIDADES DE CONSERVAÇÃO BRASILEIRAS: O CASO DO PARQUE ESTADUAL DO CERRADO (PR). **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 3, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5380/rf.v41i3.24049>.

LACERDA, H. C.; FARIA, A. L. L.; TORRES, F. T. P.; FONSECA, H. P.; SOARES, W. O.; SILVA, M. A. S. Susceptibility to wildfire in a conservation unit located in the transition region of Cerrado and Atlantic Forest Biomes, Brazil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, p. 451-473, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509864171>.

LADISLAU, F. F.; SILVA, J. da C.; MOREIRA, A. P. M.; NASCIMENTO, G. L.; AZEVEDO, Ú. R. de. Análise Multicritério aplicada ao mapeamento de risco de incêndio na APA Sul RMBH. **Cadernos de Geografia**, Belo Horizonte, v. 31, n. 66, p. 667-667, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2021v31n66p667>.

LARIS, P.; WARDELL, D. A. Good, bad or ‘necessary evil’? Reinterpreting the colonial burning experiments in the savanna landscapes of West Africa. **The Geographical Journal**, [S. l.], v. 172, p. 271-290, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2006.00215.x>.

LEWIS, J. S.; CLAIR, S. B. St.; FAIRWEATHER, M. L.; RUBIN, E. S. Fire severity and ungulate herbivory shape forest regeneration and recruitment after a large mixed-severity wildfire. **Forest Ecology and Management**, v. 555, 121692, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121692>.

LOPES, G. P. **Previsão de vendas em alta frequência do varejo brasileiro**: um estudo comparativo entre modelos tradicionais e redes neurais artificiais. 2019. Dissertação (Mestrado Profissional em Economia) – Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/items/49b31be6-c4e8-4e47-bc29-df7dede5aada>.

LOURENÇO, L.; AMARO, A. (coord.). **Riscos e Crises: da teoria à plena manifestação**. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2019. Disponível em: https://www.riscos.pt/wp-content/uploads/2018/SRC_VI/eBook-Riscos-e-Crises.

LOURENÇO, L.; ALMEIDA, A. B. Alguns Conceitos à Luz da Teoria de Riscos. *In*: LOURENÇO, L.; AMARO, A. (coord.). **Riscos e Crises: da teoria à plena manifestação**. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2019. p. 17-77.

MARRO, A.; SOUZA, A. M. de C.; CAVALCANTE, E. R. de S.; BEZERRA, G.; NUNES, R. **Lógica Fuzzy: conceitos e aplicações**. Natal: DIMAp/UFRN, [20--]. Disponível em: https://aquilesburlamaqui.wdfiles.com/local--files/logica-aplicada-a-computacao/texto_fuzzy.pdf.

MCCLURE, C. D.; JAFFE, D. A. US particulate matter air quality improves except in wildfire-prone areas. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [S. l.], v. 115, n. 31, p. 7901-7906, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1804353115>.

MEDEIROS, M. B. de; FIEDLER, N. C. Incêndios florestais no parque nacional da Serra da Canastra: desafios para a conservação da biodiversidade. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 14, n. 1, p. 157-168, 2004. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050981815>.

MESSIAS, C. G. **Modelo geoespacial para identificação de áreas com perigo de propagação de queimadas no Parque Nacional da Serra da Canastra - MG**. 2018. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

MESSIAS, C. G.; FERREIRA, M. PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA: ASPECTOS FÍSICOS E SOCIOECONÔMICOS. **Revista da ANPEGE**, [S. l.], v. 15, n. 27, p. 71-112, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5418/RA2019.1527.003>.

MILLER, J. D.; THODE, A. E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). **Remote Sensing of Environment**, v. 109, p. 66-80, 2007a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>.

MIRANDA, H. S. (org.). **Efeitos do regime de fogo sobre a estrutura de comunidades de Cerrado: Projeto Fogo**. Brasília: IBAMA; MMA, 2010. Disponível em: https://dataserver-coids.inpe.br/queimadas/queimadas/Publicacoes-Impacto/material3os/2010_Miranda_etal_FogoEstruturaCerrado_IBAMA_DE3os.pdf.

MONDRAGÓN, C. The 2019-2020 Australian Bushfires. **Anuario Asia Pacífico El Colegio de México**, p. 1-33, ago. 2021. DOI: <https://doi.org/10.24201/aap.2021.318>.

NASCIMENTO, I. V. Cerrado: o fogo como agente ecológico. **Territorium**, Portugal, n. 8, p. 25-35, 2001a. DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_8_3.

NAZAR, T. I. S. M. **O Chapadão do Diamante na Serra da Canastra/MG, Brazil: caracterização geomorfológica e análise integrada do meio físico a partir de dados multifontes**. 2018. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2018.608>.

NOVAIS, G. T. **Caracterização climática da mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e do entorno da Serra da Canastra (MG)**. 2011. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

OLIVEIRA, T. M. D. **Monitoramento dos focos de calor e do risco de incêndios florestais no município de Ituiutaba-MG**. 2019. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2019.652>.

PAUSAS, J. G.; KEELEY, J. E. Wildfires and global change. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 19, p. 387-395, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/fee.2359>.

PAUSAS, J. G.; KEELEY, J. E. A Burning Story: The Role of Fire in the History of Life. **BioScience**, v. 59, p. 593-601, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>.

PEREIRA, J.; SÁ, A.; SOUSA, A.; SILVA, J.; SANTOS, T.; CARREIRAS, J. Spectral characterisation and discrimination of burnt areas.: Springer, 1999. p. 123-138. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-60164-4_7.

PINTO, G. S.; BERNINI, H.; CUNHA, P.; MORELLI, F. CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL PARA DIFERENCIAÇÃO DE TIPOS DE QUEIMAS NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 21., 2025, Salvador. **Anais...** Salvador: Galoá, 2025. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2025/trabalhos/caracterizacao-espectral-para-diferenciacao-de-tipos-de-queimas-no-parque-nacion?lang=pt-br>.

PIVELLO, V.; FIDELIS, A. (org.). **Fire in the South American Ecosystems**. Cham: Springer Nature, 2025. (Ecological Studies, v. 250). Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-89372-8>.

PIVELLO, V. R.; VIEIRA, I.; CHRISTIANINI, A. V.; RIBEIRO, D. B.; DA SILVA MENEZES, L.; BERLINCK, C. N.; MELO, F. P. L.; MARENGO, J. A.; TORNQUIST, C. G.; TOMAS, W. M.; OVERBECK, G. E. Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 19, p. 233-255, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.06.005>.

QGIS Development Team. *QGIS: Open Source Geographic Information System*. Versão 3.40.10. Disponível em: <https://qgis.org/>

PRUDENTE, T. **Risco integrado de incêndio florestal em áreas de cerrado: contribuições metodológicas**. 2016. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016a. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2016.45>.

RAHAMAN, Z. A.; KAFY, A. A.; FATTAH, M. A.; SAHA, M. Enhancing Urban Ecological Risk Assessment by Integrating Spatial Modeling and Machine Learning for Resilient Environmental Management in UNESCO World Heritage Cities. **Earth Systems and Environment**, v. 9, p. 2723-2752, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00468-z>.

RAMALHO, A. H. C.; FIEDLER, N. C.; DIAS, H. M.; PELUZIO, T. M. de O.; SANTOS, A. R. dos; LUCAS, F. M. F. Compreendendo a ação do fogo nos ecossistemas brasileiros. **Biodiversidade Brasileira**, Brasília, v. 14, n. 1, p. 8-25, 2024. DOI: <https://doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v14i1.2180>.

REZENDE, P. S.; MARQUES, D. V.; OLIVEIRA, L. A. de. CONSTRUÇÃO DE MODELO NO QGIS E UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO - AHP PARA MAPEAMENTO DE RISCOS À INUNDAÇÃO NA ÁREA URBANA DE

PARACATU - MG. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 18, n. 61, p. 1-18, 2017. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG186101>.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. **Fitofisionomias do bioma Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 1998.

ROTHERMEL, R. C. **How to predict the spread and intensity of forest and range fires**. Ogden: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1983. DOI: <https://doi.org/10.2737/INT-GTR-143>.

RUSSELL-SMITH, J. C. Z.; MOURA, L. C.; YATES, C.; BEATTY, R.; MAFOKO, J.; JOHNSTON, S. Oportunidades de Mercado para Apoiar o Manejo Sustentável do Fogo em Paisagens com Remanescentes de Cerrado (savana) Pirofíticos. **Biodiversidade Brasileira**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 153-167, 2021. DOI: <https://doi.org/10.37002/biobrasil.v11i2.1725>.

RYLANDS, A. B.; BRANDON, K. Unidades de conservação brasileiras. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 28-36, jul. 2005. Disponível em: https://wwfbrnew.awsassets.panda.org/downloads/conservation_units.pdf.

SANTOS, S. M. B. dos; BENTO-GONÇALVES, A.; VIEIRA, A.; TEIXEIRA, G. Grandes incêndios florestais no noroeste de Portugal: explorando padrões espaciais entre 2001 e 2020, com base em dados Landsat. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 35, e68265, 2023. DOI: 10.14393/SN-v35-2023-68265. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/Lv6pn7BGbjCj4GghNVfGHdw/>.

SANTOS, S. M. B. dos; FRANCA-ROCHA, W. de J. S.; BENTO-GONÇALVES, A. J.; BAPTISTA, G. M. de M. QUANTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS FOCOS DE CALOR NO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DIAMANTINA E ENTORNO NO PERÍODO DE 2007 A 2016. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, MG v. 69, n. 4, 2017. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv69n4-44329>.

SARTORI, A. A. D. C.; SILVA, R. F. B. D.; ZIMBACK, C. R. L. Combinação linear ponderada na definição de áreas prioritárias à conectividade entre fragmentos florestais em ambiente SIG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1079-1090, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000600009>.

SCHMIDT, I. B.; FONSECA, C. B.; FERREIRA, M. C.; SATO, M. N. Implementação do programa piloto de manejo integrado do fogo em três unidades de conservação do Cerrado. **Biodiversidade Brasileira**, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 55-70, 2016a. DOI: <https://doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v6i2.656>.

SCHMOLD, D. L.; KANGAS, J.; MENDOZA, G.; PESON, M. (ed.). **The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making**. Dordrecht: Springer, 2001.

SILVA, A. B. N.; SANTOS BELTRÃO, N. E.; BARROS SANTOS, L. Utilizando imagens Sentinel-2 e índices espectrais para análise de severidade em áreas queimadas de origem antrópica: um estudo no sudeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 16, n. 1, p. 489-504, 2023. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p489-504>.

SILVA, M. G. da; ARRAES, F. D. D.; LEDO, E. R. F.; SANTOS, N. T.; FILHO, J. A. da S. Avaliação da evapotranspiração de referência por Penman-Monteith usando dados climáticos

mínimos no sertão do Ceará. **Revista Agrometeoros**, v. 7, n. 3, p. 284-293, 2013. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v7i3.1245>.

SILVA, M. C. V. **Caracterização fitofisionômica em trecho de ocorrência de cerrado no Parque Nacional da Serra da Canastra (MG) e suas interações com a textura, profundidade e umidade do solo**. 2006. 100 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

SIVRIKAYA, F.; GÜNLÜ, A.; KÜÇÜK, Ö.; ÜRKER, O. Forest fire risk mapping with Landsat 8 OLI images: Evaluation of the potential use of vegetation indices. **Ecological Informatics**, v. 79, 102461, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102461>.

SOUZA, A.; SILVA, M.; SOUZA, C.; RIBEIRO, J. Vegetation fires and children's health: towards an uninhabitable country? **Residência Pediátrica**, v. 14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.25060/residpediatr-2024.v14n4-pov>.

SOUZA, N. G. A. e. **Mapeamento de risco de incêndios florestais em parques, a partir de análise multicritério**. 2022. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.5373>.

TEDIM, F.; CARVALHO, S. Vulnerabilidade aos incêndios florestais: reflexões em torno de aspetos conceptuais e metodológicos. **Territorium**, Portugal, n. 20, p. 85-99, 2013.

TEOBALDO, D.; BAPTISTA, G. Quantificação da severidade das queimadas e da perda de sequestro florestal de carbono em unidades de conservação do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 9, n. 1, p. 250-264, 2016.

TIZIANEL, B. T. Z.; JUNIOR, H. A. M. **Equipe responsável pela elaboração do planejamento específico**. [S. l.: s. n.], 2023.

TURCO, M.; JEREZ, S.; AUGUSTO, S.; TARÍN-CARRASCO, P.; RATOLA, N.; JIMÉNEZ-GUERRERO, P.; TRIGO, R. M. Climate drivers of the 2017 devastating fires in Portugal. **Scientific Reports**, v. 9, 13886, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50281-2>.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. **2016 UNDP-GEF Annual Performance Report**. [S. l.]: UNDP Global Environmental Finance Unit, 2017. Disponível em: <https://www.undp.org/publications/2016-undp-gef-annual-performance-report>.

VELDMAN, J. W.; OVERBECK, G. E.; NEGREIROS, D.; MAHY, G.; LE STRADIC, S.; FERNANDES, G. W.; DURIGAN, G.; BUISSON, E.; PUTZ, F. E.; BOND, W. J. Where Tree Planting and Forest Expansion are Bad for Biodiversity and Ecosystem Services. **BioScience**, [S. l.], v. 65, n. 11, p. 1011-1018, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1093/biosci/biv118>.

VERDE, J.; ZÊZERE, J. L. Avaliação da perigosidade de incêndio florestal. **Territorium**, Portugal, n. 14, p. 103-111, 2007.

WASSNER, N.; RODRIGUES, A. F.; NUNES, A. Avaliação da recuperação de vegetação sob diferentes condições de severidade do fogo no centro de Portugal. **Cadernos de Geografia**, Coimbra, n. 51, p. 3-22, 2025. DOI: https://doi.org/10.14195/0871-1623_51_1.

ZHANG, G.; WANG, M.; LIU, K. Forest Fire Susceptibility Modeling Using a Convolutional Neural Network for Yunnan Province of China. **International Journal of Disaster Risk Science**, [S. l.], v. 10, p. 386-403, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13753-019-00233-1>.

ZHAO, P.; ZHANG, F.; LIN, H.; XU, S. GIS-Based Forest Fire Risk Model: A Case Study in Laoshan National Forest Park, Nanjing. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 13, n. 18, 3704, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13183704>.

ZORZETTO, R. Cerrado ameaçado. **Pesquisa FAPESP**, São Paulo, v. 309, p. 52-57, nov. 2021. Disponível em: https://dataserver-coids.inpe.br/queimadas/queimadas/Publicacoes-Impacto/material3os/2021_Zorzetto_CerradoAmeacado_RPFapesp_DE3os.pdf.